

# 基于 UWB 技术的室内智能跟随系统的实现与优化

刘关迪 赵璐\*

(南京工业大学计算机科学与技术学院 江苏 南京 211816)

**摘要** 针对传统的自动跟随设备存在使用条件苛刻、定位跟随能力差等缺陷,提出一个基于 UWB 技术的室内智能定位跟随系统。讨论双基站的跟随模型,在误差分析的基础上,提出带误差容忍度的实时纠偏自动跟随算法。针对双基站跟随模型的“完美背离”等问题做进一步优化处理,提出三基站跟随模型,解决双基站存在的问题,提高跟随效率。实验结果表明,基于该系统的设备可以正确自动跟随目标。

**关键词** UWB 自动跟随 双基站定位 三基站定位 误差分析

中图分类号 TP23

文献标志码 A

DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2020.12.015

## IMPROVEMENT AND IMPLEMENTATION OF INDOOR INTELLIGENT FOLLOWING SYSTEM BASED ON UWB TECHNOLOGY

Liu Guandi Zhao Lu\*

(College of Computer Sciences and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China)

**Abstract** To avoid the defects such as strict application conditions and poor positioning ability of traditional automatic following equipment, this paper proposes and designs an indoor intelligent following system based on UWB (Ultra Wideband) technology. We discussed the following model with two-base-station and proposed a real-time correction following algorithm with error tolerance based on error analysis; The following model with three base-station was proposed to solve the special problems like “perfect deviation” of two-base-station and improve following efficiency. The experimental results show that devices based on this system can follow the target correctly.

**Keywords** UWB Automatic following Two-base-station positioning Three-base-station positioning Error analysis

## 0 引言

随着技术的发展和应用场景的扩展,可移动设备的智能跟随需求越来越大。然而目前主流采用的红外传感器、超声传感器等定位方式存在着无法锁定跟随目标,易偏离目标失去定位的问题<sup>[1]</sup>。这是因为室内环境下障碍物较多,传感器对目标的测距易被障碍物阻挡,导致测量错误;而 GPS 信号功率低、接收要求高,室内定位时建筑物的阻挡又减弱了信号,导致 GPS 的定位精度低。因此,设计并实现一种可以精确定位目标、准确自动跟随的系统很有必要。

本文使用 UWB (Ultra Wideband) 技术实现精确定位,以树莓派小车为移动设备,设计并实现一个实时自动跟随系统,并进一步对系统的可优化性进行讨论。

## 1 UWB 技术简介

UWB 是一种无载波通信技术,其脉冲宽度仅为纳秒级或亚纳秒级,拥有数据传输速率高、发射平均功率谱密度低等多种优点。其在定位方面有着两方面优势:

1) 由于其窄脉冲特点,定位精度可达厘米级甚至

更高。

2) UWB 通信采用调时序列,时间分辨率高,具有抗多径能力和一定的穿透能力,适用于高速、低速等不同移动环境<sup>[2-3]</sup>。

因此,UWB 技术凭借其穿透性,可以很好地消除室内障碍物对定位的影响;其信息传送能力良好,测距准确,精度高。该技术的使用解决了传统室内定位方法遇到的困难。近年来,国内外逐渐将 UWB 技术应用于近距离精确室内定位,IEEE 802.15.4a 标准采用 UWB 为定位首选技术<sup>[4-5]</sup>。

### 1.1 室内定位模块

UWB 用于室内定位时,需要配置定位标签和定位基站两种模块。

(1) 定位标签。定位标签用于配置在需要定位的目标端,是 UWB 定位的主模块。其体积小,功耗低,可制成或集成于各类穿戴设备中,便于定位目标携带。定位标签为有源电子标签,每个标签具有唯一的 ID,可以将目标与 ID 一对一绑定。

(2) 定位基站。定位基站是 UWB 定位的从模块。基站可以通过飞行时间测距法等多种方法,确定标签的位置,并将数据传输至网络控制器及定位引擎软件,定位精度达到厘米级。

### 1.2 测距原理

UWB 测距使用飞行时间测距法(Time of Flight)。该技术需要在异步收发机(Transceiver)之间有准确的时间同步<sup>[6-7]</sup>,利用射频信号在异步收发机间的飞行时间  $T_{TOF}$  转换为两点之间的距离  $d$ :

$$d = c \cdot T_{TOF} \quad (1)$$

式中: $c$  为射频信号的传播速度,可认为其等同于真空中的光速。

飞行时间测距法测距流程<sup>[8]</sup>如图 1 所示,其中:TX 表示发送;RX 表示接收。设备 A 在  $T_{sA}$  时刻发送请求脉冲信号,设备 B 在  $T_{rB}$  时刻接收该信号,并于  $T_{sB}$  时刻发射响应信号,设备 A 在  $T_{rA}$  时刻接收该响应信号。设定设备 A 发送脉冲信号和接收到响应信号的时间间隔为  $T_{round}$ ,设备 B 从接收到请求脉冲信号到发射响应信号的时间间隔为  $T_{reply}$ ,则:

$$\begin{cases} T_{round} = T_{rA} - T_{sA} \\ T_{reply} = T_{sB} - T_{rB} \\ T_{TOF} = \frac{T_{round} - T_{reply}}{2} \end{cases} \quad (2)$$

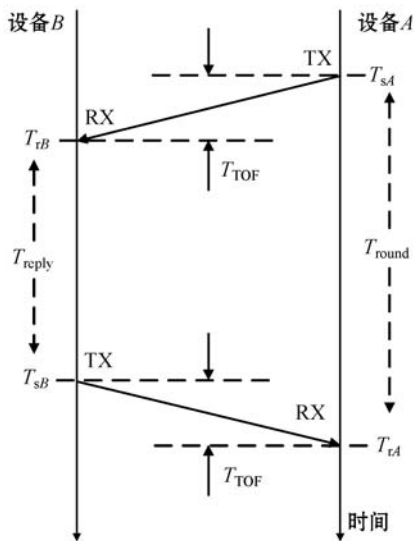


图 1 TOF 测距过程

## 2 系统设计与实现

如图 2 所示,系统由两部分组成:用于实现自动跟随的树莓派小车和跟随目标定位模块。跟随目标携带一块 UWB 主模块作为标签,小车配置两块 UWB 从模块作为基站。通过实时测量两个基站与标签之间的距离,结合数据处理来判断目标方向,实现跟随。

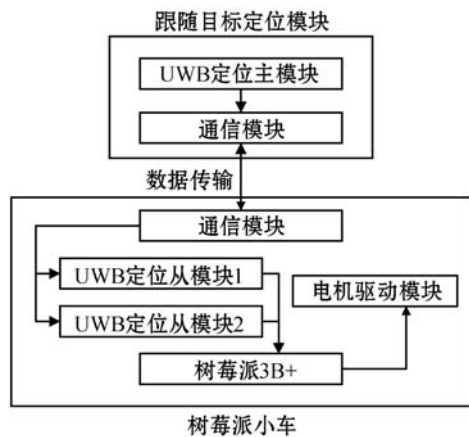


图 2 系统硬件结构示意图

### 2.1 UWB 模块选型

系统的 UWB 模块选用 SWM1000 射频模块。SWM1000 模块是基于 Decawave 的 DW1000 收发器的集成电路,其集成了天线、电源管理和时钟电源系统,可用于高精度室内测距与定位。

### 2.2 跟随小车的结构设计

跟随小车由树莓派控制,小车的四个轮子各配有一个步进电机,树莓派通过驱动不同电机实现小车的前进、后退和转弯;通过控制 PWM(Pulse Width Modulation) 输出值的变化实现小车速度的变化。

作为基站的两块 SWM1000 从模块对称安装于小

车后方左、右两端,与树莓派 USB 接口通过 TTL 转 USB 转换器相连。

### 2.3 跟随距离的确定

跟随目标上的标签与跟随小车上两个基站绑定、配对后建立通信通道。单次测距由标签主动发起,基站一直处于等待监听状态,并在收到标签发来的测距开始消息后与标签交互完成一次距离测量<sup>[9]</sup>。获得与标签距离后,基站将测量距离通过 USB 接口发送至树莓派。

如图 3 所示,设定两个基站 A、B 各自与 y 轴的距离为常数  $d_s$ 。左侧基站 A 距离目标标签 E 长度为  $d_1$ ,右侧基站 B 距离目标标签 E 长度为  $d_2$ ,小车中心 O 距离目标标签 E 的距离为  $x$ ,设目标标签 E、小车中心 O 与 x 轴负方向构成夹角为  $\theta$ 。

可以得到:

$$\begin{cases} \cos\theta = \frac{d_s^2 + x^2 - d_1^2}{2d_s x} \\ \cos(\pi - \theta) = \frac{d_s^2 + x^2 - d_2^2}{2d_s x} \end{cases} \quad (3)$$

从而可以求解出未知量:

$$x = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2}{2} - d_s^2} \quad (4)$$

由此可见,小车与跟随目标的距离的计算仅与  $d_1$ 、 $d_2$  和  $d_s$  有关,与小车在当前距离下的具体朝向无关。

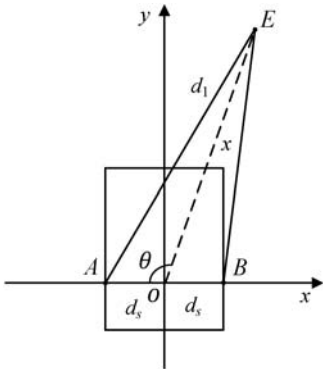


图 3 跟随小车定位示意图

### 2.4 水平距离的计算

为了不影响跟随目标的正常移动,当跟随设备距离跟随目标一定距离时,跟随设备暂停接近,从而实现与目标保持距离的要求。这需要计算标签与跟随小车的水平距离。

跟随目标与跟随设备的距离如图 4 所示。设定小车左侧基站为 A,右侧基站为 B,基站 A、B 连线的中点为 O,标签距离地面高度为  $DE = h$ 。已知两个从模块至主模块的实时距离  $AE = d_1$ ,  $BE = d_2$ ,两基站至中点

的距离  $AO = BO = d_s$ 。OE 即式(4)所求  $x$ 。

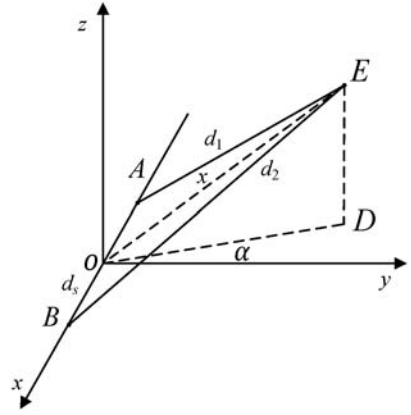


图 4 基站与标签空间位置示意图

$DE$  长度为标签距地高度,需要从外界获得,因为不同的高度会影响跟随设备与跟随目标水平距离  $OD$  的计算。

跟随设备距离目标的水平距离即为  $OD$ 。易得:

$$\begin{aligned} x^2 &= OD^2 + DE^2 \\ OD &= \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2}{2} - d_s^2 - h^2} \end{aligned} \quad (5)$$

跟随小车与目标的水平停止距离可由外部输入设定,设该距离为  $k$ ,即  $OD$  的理论最小值为  $k$ 。小车实际运行时,只要在  $OD \leq k$  的情况下,就会暂停进一步靠近,从而实现跟随小车实时与目标保持一定距离的要求。

## 3 跟随实现的误差讨论

### 3.1 理想状态的运动

在理想化的情况下,假设小车当前方向偏移其理想正对目标方向至多  $\pi/2$ ,小车可以通过自身的左右旋转,以达到两基站测距值  $d_1 = d_2$ ,即达到两个基站与标签距离相等的方向。此时跟随小车正对目标,直行即可。若  $d_1 < d_2$ ,则跟随设备向左旋转; $d_1 > d_2$  时向右旋转,直至  $d_1 = d_2$ 。

### 3.2 实际状况的推导

在现实情况下, $d_1 = d_2$  的精准情况几乎难以稳定保持,因为小车直行时不能保证其没有任何角度的偏差,UWB 在定位时也存在一定的误差<sup>[10]</sup>。因此,可以设定误差容忍区间,跟随小车的运动偏移情况只要在误差容忍区间内,就选择前进,如果超出,则在运动中纠偏,从而实现小车在运动过程中不断调整方向的需求。

如图 4 所示,令夹角  $\alpha$  为小车理想正对目标方向与小车当前朝向所形成的夹角。为简化讨论,设定

$\alpha \in [0, \pi/2]$ , 设  $D$  点的坐标为  $(x_D, y_D, 0)$ 。

通过空间解析几何分析, 可以得到:

$$\begin{cases} (x_D + d_s)^2 + y_D^2 + h^2 = d_1^2 \\ (x_D - d_s)^2 + y_D^2 + h^2 = d_2^2 \\ \alpha = \arctan \left| \frac{x_D}{y_D} \right| \end{cases} \quad (6)$$

解得:

$$\alpha = \begin{cases} \arctan \left( \frac{|d_1^2 - d_2^2|}{\sqrt{-(d_1^2 - d_2^2 + 4d_s^2)^2 + 16d_1^2 d_s^2 - 16h^2 d_s^2}} \right) & |d_1 - d_2| \neq 2d_s \\ \frac{\pi}{2} & |d_1 - d_2| = 2d_s \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知,  $\alpha$  的计算仅能确定小车当前车头方向相对于理想正对目标方向的偏移角度, 但不能指出其具体偏移方向, 即无法确定是左偏还是右偏。因此, 需要同时结合  $d_1$  和  $d_2$  的大小关系判断小车的偏移方向。

在系统实际应用中, 可设定小车距跟随目标任意距离处的误差容忍度数为  $\gamma$ 。当  $\alpha < \gamma$ , 即小车运动偏移情况在误差容忍区间内, 则直行; 当  $\alpha \geq \gamma$  时, 小车通过自身的偏移转动, 调节车头方向, 使  $\alpha$  重新回归误差容忍区间内, 实现运动中跟随。

因此, 小车的运动逻辑如下:

由式(5)得,  $OD \leq k$  时, 小车暂停进一步靠近; 当  $OD > k$  时, 小车运动情况如表 1 所示。

表 1 双基站定位跟随系统根据测距情况的运动调整逻辑表

当前测距情况	$\alpha < \gamma$	$d_1 > d_2$ 且 $\alpha \geq \gamma$	$d_1 < d_2$ 且 $\alpha \geq \gamma$
运动调整	直行	向左偏转	向右偏转

综上所述, 双基站定位跟随系统需要通过设定获得跟随设备与目标的水平停止距离  $k$ , 标签距地高度  $h$ , 误差容忍度数  $\gamma$ 。在以上的条件下, 跟随小车均能找到目标方向并进行调整, 实现自动跟随的效果。

## 4 系统的优化方式

### 4.1 双基站定位跟随系统的缺陷与解决措施

3.2 节的讨论均是以假设小车的理想正对目标方向与小车当前朝向偏差夹角至多  $\pi/2$ , 即  $\alpha \in [0, \pi/2]$  的情况为基础的。由此扩展到  $\alpha \in [0, \pi]$ , 在这种情况下, 小车可能处于相对于跟随目标的任意一种朝向。

当  $\alpha \in (0, \pi/2)$  时,  $\alpha$  的值即为式(7)所求解值。当  $\alpha \in (\pi/2, \pi)$  时, 通过空间解析几何分析:

$$\alpha = \pi - \arctan \left( \frac{|d_1^2 - d_2^2|}{\sqrt{-(d_1^2 - d_2^2 + 4d_s^2)^2 + 16d_1^2 d_s^2 - 16h^2 d_s^2}} \right) \quad (8)$$

在实际情况下, 由于  $\alpha \in [0, \pi]$ , 在一组确定的  $d_1, d_2$  情况下, 计算过程中会出现小车正对目标和背对目标都有相应  $\alpha$  解的问题, 从而无法判断小车是否正向跟随目标。

如图 5 所示, 取小车车头前进方向为  $y$  轴正方向, 根据  $d_1, d_2$  求得的偏移角度可以是标签在  $E$  点时, 利用式(7)计算出的偏移角  $\alpha$ , 也可以是标签在  $E'$  点时, 利用式(8)计算出的偏移角  $\alpha'$ 。因此, 小车是正对还是背对跟随目标无法通过  $d_1, d_2, d_s$  的关系确定, 也无法通过三者的关系确定选择使用式(7)还是式(8)的计算式来计算  $\alpha$ 。

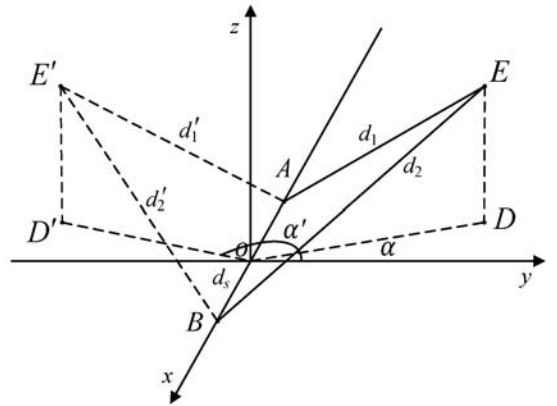


图 5 偏移角度  $\alpha$  的多种取值情况

为了解决这个问题, 可以定义  $\beta$  为小车理想正对目标方向与当前朝向所在的直线所成的非钝角, 即  $\beta \in [0, \pi/2]$ 。当  $\alpha \in [0, \pi/2]$  时,  $\beta = \alpha$ ;  $\alpha \in (\pi/2, \pi]$  时,  $\beta = \pi - \alpha$ 。因此,

$$\beta = \begin{cases} \arctan \left( \frac{|d_1^2 - d_2^2|}{\sqrt{-(d_1^2 - d_2^2 + 4d_s^2)^2 + 16d_1^2 d_s^2 - 16h^2 d_s^2}} \right) & |d_1 - d_2| \neq 2d_s \\ \frac{\pi}{2} & |d_1 - d_2| = 2d_s \end{cases} \quad (9)$$

$\beta$  的计算式在  $\alpha \in [0, \pi/2]$  与  $\alpha \in (\pi/2, \pi]$  之间是统一的, 其不受小车是否正对跟随目标而造成的计算影响。当获得一组  $d_1, d_2$  时, 可通过式(9)直接计算出  $\beta$  的取值。

当  $d_1 > d_2$  且  $\beta \geq \gamma$  时, 无论小车正对还是背对目标, 都需要向左偏转; 当  $d_1 < d_2$  且  $\beta \geq \gamma$  时, 无论小车正对还是背对目标, 都需要向右偏转。在此变量范围内, 小车的运动逻辑与表 1 是相似的。

当  $\beta < \gamma$  时, 如果仍参考表 1 的运动逻辑, 那么跟随小车无论车头是正对还是背对跟随目标, 均会执行向前运动的操作, 从而可能出现直行背离跟随目标的

情况。而只要始终保持该角度范围,这种背离会持续下去,形成“完美背离”现象。

对于这种情况,可以先让小车直行运动,计算一段时间内的  $x$  累计变化。如果该段时间内  $x$  的值是持续变大的,则判断为小车正在背离运行目标,因此需要调转头;相反,如果  $x$  的值在直行过程中是逐渐变小的,则可以判断小车正在接近目标,方向是正确的。

修正后的运动逻辑如下:

当  $x \leq k$  时,小车暂停进一步靠近;当  $x > k$  时,小车运动情况如表 2 所示。

表 2 修正后双基站定位跟随系统的运动调整逻辑表

当前测距情况	$\beta < \gamma$		$\beta \geq \gamma$	
	直行时 $x$ 累计变大	直行时 $x$ 累计变小	$d_1 > d_2$	$d_1 < d_2$
运动调整	向后转,直至 $\beta \geq \gamma$	直行	向左偏转	向右偏转

### 4.2 三基站定位跟随的优化与实现

4.1 节中的方法虽然可以解决问题,但是如果在计算累计变化的过程中,跟随目标做出的是变速幅度较大的移动,跟随小车就容易出现判断错误。同时,双基站定位系统依赖于用户自行输入的标签高度。一方面,这需要保证系统的高度设置要跟随标签的高度变化而进行修改。另一方面,如果标签高度的输入出现误差,会影响跟随小车到目标的水平距离计算,导致系统跟随效果变差。

为解决这些问题,可以引入第三个基站,构建三基站定位系统。第三个基站安装于小车的头部,三个基站构成一个等边三角形。

如图 6 所示建立坐标系,  $A, B, C$  为三个基站,三角形  $ABC$  为等边三角形。  $E$  为标签,标签  $E$  投影至  $xoy$  平面于  $D$ 。  $AB = AC = BC = 2d_s, H$  是等边三角形  $ABC$  的中心。  $O$  为  $AB$  中点。设定  $A$  基站、 $B$  基站、 $C$  基站与标签的距离分别为  $d_1, d_2, d_3$ 。设小车理想正对目标方向与小车当前朝向所形成的夹角,即图中  $DH$  与  $y$  轴正方向所成角为  $\alpha (\alpha \in [0, \pi])$ 。

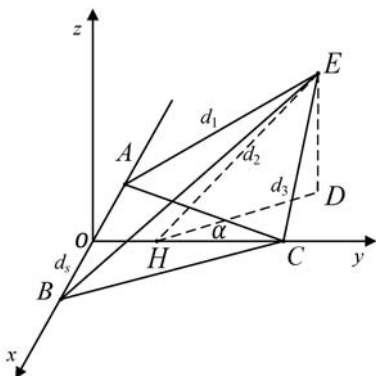


图 6 三基站定位示意图

令  $E$  点坐标为  $(x_E, y_E, z_E)$ , 通过空间解析几何求解,可以得到:

$$\begin{cases} (x_E + d_s)^2 + y_E^2 + z_E^2 = d_1^2 \\ (x_E - d_s)^2 + y_E^2 + z_E^2 = d_2^2 \\ x_E^2 + (y_E - \sqrt{3}d_s)^2 + z_E^2 = d_3^2 \\ DH = \sqrt{x_E^2 + (y_E - \frac{1}{\sqrt{3}}d_s)^2} \\ \alpha = \angle DHC \end{cases} \quad (10)$$

解得:

$$DH = \sqrt{\frac{d_1^4 + d_2^4 + d_3^4 - d_1^2 d_2^2 - d_1^2 d_3^2 - d_2^2 d_3^2}{12d_s^2}} \quad (11)$$

$$\alpha = \angle DHC = \begin{cases} \arctan \frac{\sqrt{3} |d_1^2 - d_2^2|}{d_1^2 + d_2^2 - 2d_3^2} & d_1^2 + d_2^2 - 2d_3^2 > 0 \text{ 且 } d_1 \neq d_2 \\ \pi/2 & d_1^2 + d_2^2 - 2d_3^2 = 0 \\ \pi + \arctan \frac{\sqrt{3} |d_1^2 - d_2^2|}{d_1^2 + d_2^2 - 2d_3^2} & d_1^2 + d_2^2 - 2d_3^2 < 0 \text{ 且 } d_1 \neq d_2 \\ 0 & d_1 = d_2 \text{ 且 } \min(d_1, d_2, d_3) = d_3 \\ \pi & d_1 = d_2 \text{ 且 } \max(d_1, d_2, d_3) = d_3 \end{cases} \quad (12)$$

由式(11)可以得到,  $DH$  的长度与  $ED$  无关,即标签  $E$  的高度对  $DH$  的计算没有影响,所以三基站定位跟随系统不需要外部输入标签高度。

之所以在双基站定位跟随系统中出现“完美背离”的情况,是因为系统仅通过  $d_1$  和  $d_2$  的关系,无法区分跟随小车正对或背对目标的状态。而三基站系统中  $\alpha \in [0, \pi]$ ,只要获得一组  $d_1, d_2, d_3$  的值,就可以通过式(12)计算出  $\alpha$  的值,从而明确地判断小车相对目标方向的具体偏移度数。

仍设定跟随小车与目标的水平停止距离为  $k$ ;跟随小车距标签任意距离处,误差容忍度数为  $\gamma$ 。三基站定位跟随系统中小车运动逻辑如下:

由式(11)得,  $DH \leq k$  时,小车暂停进一步靠近;当  $DH > k$  时,小车运动情况如表 3 所示。

表 3 三基站定位跟随系统根据测距情况的运动调整逻辑表

当前测距情况	$\alpha < \gamma$	$d_1 > d_2$ 且 $\alpha \geq \gamma$	$d_1 < d_2$ 且 $\alpha \geq \gamma$
运动调整	直行	向左偏转	向右偏转

综上所述,三基站定位跟随系统只需设定跟随小车与目标的水平停止距离  $k$ ,误差容忍度数  $\gamma$ ,即可实现小车的自动跟随。其不仅减少输入参数的个数,同时解决双基站定位系统中“完美背离”的情况,更易处

理分析。

## 5 实验数据与分析

实验进行于东西朝向 4 m, 南北朝向 6 m 的房间内部。被跟随者与小车各自额外携带一块 UWB 定位标签, 房间四个角落分别安装一块 UWB 定位基站。通过四个定位基站对两个定位标签测距即可计算出被跟随者与小车位于室内的坐标。

被跟随者采用正常步速运动。设定双基站定位跟随系统最小保持距离  $k=0.4$  m, 标签距地高度  $h=1.5$  m, 最大误差容忍度数  $\gamma=\pi/6$ 。其运动路径与双基站定位跟随小车运动路径如图 7 所示。

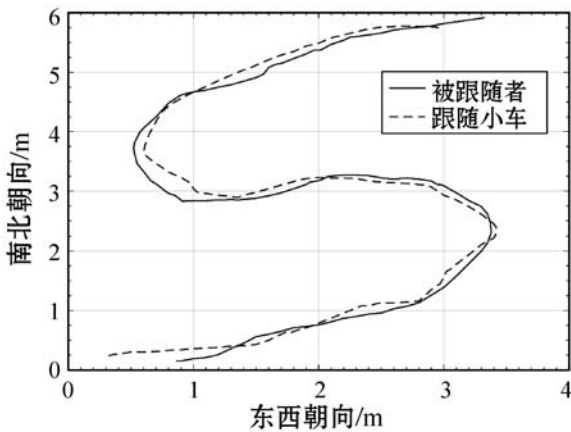


图 7 双基站定位跟随中被跟随者与跟随小车运动路径

设定三基站定位跟随系统最小保持距离  $k=0.4$  m, 最大误差容忍度数  $\gamma=\pi/6$ , 无须设定标签距地高度。被跟随者与三基站定位跟随小车的运动路径如图 8 所示。

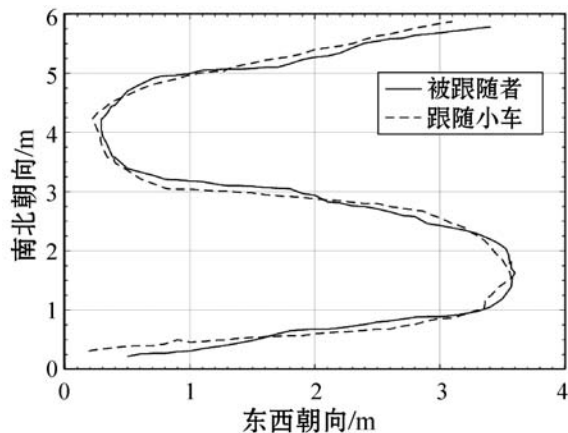


图 8 三基站定位跟随中被跟随者与跟随小车运动路径

可见, 无论是双基站定位还是三基站定位, 均可实现小车的室内自动跟随, 识别准确, 不易跟丢。三基站相较双基站定位跟随方法, 在保证准确跟随的同时, 减少参数的输入, 并避免“完美背离”的发生。

## 6 结 语

本文以 UWB 定位为基础, 提出可以实时路径纠偏, 实现智能跟随的自动跟随设备。由跟随过程中的误差讨论, 提出并改进双基站跟随小车的跟随方式, 并进一步提出三基站定位跟随的优化方法。在实验过程中, 跟随小车已成功实现智能定位和跟随。本系统具有识别准确度高、跟随中纠偏等多种优势, 具有良好的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] 舒华, 宋辞, 裴韬. 室内定位数据分析与应用研究进展[J]. 地理科学进展, 2016, 35(5): 580-588.
- [2] 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.
- [3] Angelis A D, Dionigi M, Moschitta A, et al. Characterization and modeling of an experimental UWB pulse-based distance measurement system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(5): 1479-1486.
- [4] Molisch A F, Balakrishnan K, Cassioli D, et al. IEEE 802.15.4a channel model-final report[J]. IEEE, 2004, 15(4): 1-40.
- [5] Tiemann J, Schweikowski F, Wietfeld C, et al. Design of an UWB indoor-positioning system for UAV navigation in GNSS-denied environments[C]//2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2015.
- [6] Angelis A D, Dwivedi S, Handel P. Characterization of a flexible UWB sensor for indoor localization[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(5): 905-913.
- [7] Daniel M, Benedict O. Ultrawideband (UWB) technology for smart cities IoT applications[C]//2018 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), 2018.
- [8] Sang C L, Adams M. Numerical and experimental evaluation of error estimation for two-way ranging methods[J]. Sensors, 2019, 19(3): 616.
- [9] Mazraani R, Saez M, Govoni L, et al. Experimental results of a combined TDOA/TOF technique for UWB based localization systems[C]//2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), 2017.
- [10] Wang A, Song Y. Improved SDS-TWR ranging technology in UWB positioning[C]//2018 International Conference on Sensor Networks and Signal Processing (SNSP), 2018.