

[文章编号] 1003—4684(2020)05-0001-07

基于超宽带技术的室内无线定位系统设计

许 万, 涂 拓, 胡天宇, 胡新宇

(湖北工业大学机械工程学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 针对室内无线定位存在的动态性强、传输距离短、抗多径效应差、定位精度差、室内环境复杂等问题,通过超宽带信号在基站和标签之间的飞行时间测得基站和标签的距离。将这个距离值上传给上位机,上位机再通过加权质心算法计算出标签位置坐标。分别进行静态和动态实验,分析定位系统在视距和非视距情况下的定位误差。实验结果表明:超宽带无线定位系统定位精度较高,在室内视距情况下可以高达 10 cm 左右;在非视距环境下,由于受到的干扰较大,定位精度在 30 cm 左右。

[关键词] 室内定位; 超宽带; 质心算法; 定位误差

[中图分类号] P228.4 [文献标识码] A

室内无线定位技术主要有 WIFI、ZigBee、蓝牙^[1]、射频识别(Radio Frequency Identification)、超声波、超宽带(Ultra-wideband, WB)等技术^[2]。其中:WiFi 技术^[3]信号实时性差,定位精度不高,抗干扰能力不强,周边的其他信号容易对其造成干扰; Zigbee 技术^[4]定位精度不高,一般在 5 m 左右,数据堵塞现象严重,对于系统正常运行影响大;射频识别技术^[5]抗干扰能力差,设施设备施工难度较大,维护成本高,系统不稳定;超声波技术^[6]采用的是反射式测距,信号衰减严重,以致严重影响定位的范围; UWB 技术^[7]通过在很宽的频谱范围上传输一连串极窄且能量很低的脉冲信号,实现低功耗信号传输,其产生的干扰较小,而且可检测的概率很低,具有极强的抗多径衰落能力^[8-9],有利于在室内复杂多径环境中进行实时定位和动态数据收集,是目前室内定位的研究热点^[10]。UWB 技术多种定位方式,如利用信号接收器到周围信号发射器的信号强度来判断标签的位置^[11],和采用信号到达时间来确定目标节点位置坐标^[12],但这些方式均存在定位精度较低的问题。因此,本文针对室内复杂的定位环境,基于三边定位算法的相交质心定位算法建立 UWB 室内无线定位系统。

1 系统整体设计及定位原理

1.1 整体系统设计

UWB 无线定位系统分为三个部分:定位基站、

定位标签和上位机软件。定位系统的整体结构如图 1 所示。

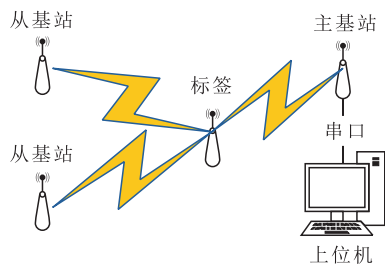


图 1 UWB 无线定位系统

图 1 中,基站和标签的硬件部分为一体化的硬件板,通过使用拨码开关的方式实现基站和标签模块之间的切换。主基站将带有时间戳和帧序号等信息数据包发送给上位机,上位机软件接收数据包,通过解析接收到的信息进行算法处理,得到基站和标签的位置坐标,并将基站和标签坐标可视化显示出来。

1.2 定位原理

信号达到时间(TOA)定位算法是一种基于信号达到时间的测量距离的定位方式,具有实现简单、定位精度高而且不需要基站与标签之间时钟严格同步等特点,是通过测得信号在标签与基站之间的飞行时间得到标签与基站之间的距离(图 2)。

图 2 中, $A_0(x_0, y_0)$, $A_1(x_1, y_1)$, $A_2(x_2, y_2)$ 分别为 3 个基站的坐标位置, $T(x, y)$ 是标签的坐标位置, R_0, R_1, R_2 分别为标签 T 到 3 个基站的距离。以 A_0, A_1, A_2 为圆心,以 R_0, R_1, R_2 为半径值作圆,理想状态下以 A_0, A_1, A_2 为圆心的圆会相交于一

[收稿日期] 2020—02—24

[基金项目] 国家自然科学基金(61976083); 绿色工业科技引领计划(CPYF2018007)

[第一作者] 许 万(1979—), 男, 湖北武汉人, 湖北工业大学教授, 研究方向为移动机器人, 多轴运动控制

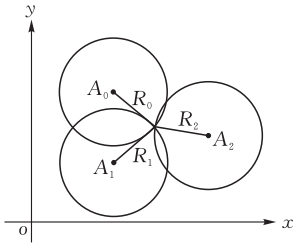


图2 三边测量定位方法

点,这个点的坐标即标签位置坐标。根据圆的相交关系,建立非线性方程:

$$\begin{cases} (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 = R_0^2 \\ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = R_1^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 = R_2^2 \end{cases}$$

式中, $x_0, x_1, x_2, y_0, y_1, y_2, R_0, R_1, R_2$, 都是已知值,仅有 x, y 是未知值,因此,可使用最小二乘法对标签位置 $T(x, y)$ 进行求解。

首先假设有 n 个基站,基站的坐标为 (x_i, y_i) ($i=1, 2, \dots, n$),标签坐标为 (x, y) ,各基站与标签的测距值为 R_i ($i=1, 2, \dots, n$)。依据三边测量定位算法对于标签位置进行求解,建立方程:

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = R_1^2 \\ \vdots \\ (x-x_n)^2 + (y-y_n)^2 = R_n^2 \end{cases}$$

将所有方程与最后一个方程相减,得到一个新的方程组:

$$\mathbf{AX} = \mathbf{b}$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ 2(x_2 - x_n) & 2(y_2 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + R_n^2 - R_1^2 \\ x_2^2 - x_n^2 + y_2^2 - y_n^2 + R_n^2 - R_2^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + R_n^2 - R_{n-1}^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

引入测距误差 \mathbf{N} , 可得

$$\mathbf{AX} + \mathbf{N} = \mathbf{b}$$

式中, \mathbf{N} 表示 $n-1$ 维随机误差向量。

使用最小二乘法估计式:

$$\mathbf{X}_{LS} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}$$

在实际的定位过程中,考虑到环境噪声、人工测量等因素引起的测距误差,有必要将每个基站的测量值指定一个权值,以此来提高定位的准确性。引入一个加权矩阵

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & w_n \end{bmatrix}$$

可以得到加权后的最小二乘估计式:

$$\mathbf{X}_{LS} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{b}$$

当测距误差与测量距离之比符合独立分布的高斯随机变量条件(即 $\mathbf{W} = \mathbf{R}^{-1}$) 时, \mathbf{X}_{WLS} 的均方差误差值最小,其中 \mathbf{R} 表示测距误差的方差矩阵。

上文使用三边测量定位均假设在理想状态,此时以基站 A_0, A_1, A_2 为圆心,以 R_0, R_1, R_2 为半径值作的圆交于一点,在实际测量的情况下存在多径效应以及非视距等,往往会使测量的距离值比实际距离值要大,此时以 A_0, A_1, A_2 为圆心,以 R_0, R_1, R_2 为半径值作的圆并不会恰好相交于一个点,而是会交于一个区域(图3)。

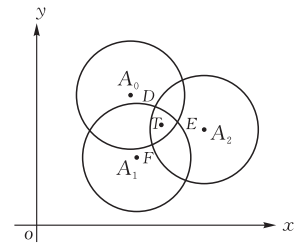


图3 三圆相交情况

为了让测量标签位置坐标与实际的标签位置更加接近,使用基于三边测量定位的加权相交质心定位算法,即由3个基站为圆心,以3个基站到标签的距离为半径值作的圆相交区域的质心位置坐标,就是标签的位置坐标。

根据3个圆相交情况,对于图3中F点可得

$$\begin{cases} (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 = R_0^2 \\ (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = R_1^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 \leq R_2^2 \end{cases}$$

同理,通过解方程组,可以解出另外两个相交点D, E的坐标。

在几何学中,多边形顶点位置坐标的平均值被视为质心的位置坐标。前文分别以3个基站为圆心,以基站到标签的距离为半径值作的圆,相交于3个点。以这3个点作为三角形的3个顶点,将三角形的质心坐标作为标签的位置估计值,则标签坐标 (x, y) 可表示为:

$$\begin{cases} x = \frac{x_D + x_E + x_F}{3} \\ y = \frac{y_D + y_E + y_F}{3} \end{cases}$$

基站距离标签的位置越远,其测距误差会越大,对标签坐标的精度会有较大的影响,也就是说,距离标签越近的基站,其测量值应在计算 (x, y) 时占据更大的权重,从而进一步提高质心估计值的准确性。

本文基于测量值来设定各交点的权值, F 点是圆 A_0 和圆 A_1 的交点,设定权值为 $\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1}$, 这样测

距值 R 越小的基站,其权值 $\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} (i=1,2,3;j=1,2,3)$ 就越大,也就实现了距离标签越近的基站,其测距值在 (x,y) 的计算中占据更大的权值。采用加权法后,标签坐标 (x,y) 可表示为:

$$\begin{cases} x = \frac{x_D\left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1}\right) + x_E\left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_2}\right) + x_F\left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1}\right)}{2\left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)} \\ y = \frac{y_D\left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1}\right) + y_E\left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_2}\right) + y_F\left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1}\right)}{2\left(\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)} \end{cases}$$

2 硬件系统

2.1 硬件模块

本文设计的硬件模块由微控制器模块、UWB 无线收发模块、电源模块、LED 指示模块、拨码开关和复位电路等 5 个部分组成。微控制器采用基于 ARM Cortex-M 内核 STM32 系列的 32 位的微控制器 STM32C8T6 芯片,UWB 无线收发模块采用爱尔兰公司 Deca-wave 公司的 DWM1000 芯片。硬件组成如图 4 所示。

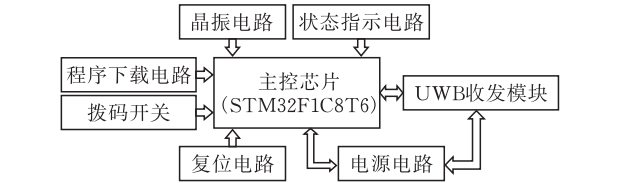


图 4 硬件系统组成

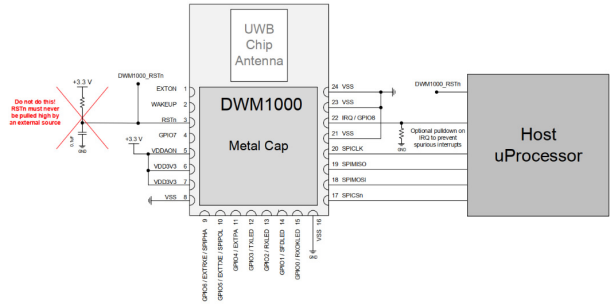
微控制器 STM32 芯片与 UWB 模块通过 SPI 通讯,实现对 UWB 模块的控制和状态读取,完成测距信息的采集和传输;UWB 模块负责无线信号的收发;晶振电路产生原始的时钟频率为主控芯片提供时钟信号;拨码开关用来切换基站标签模式;复位电路控制主控芯片在上电或复位过程中的复位状态;电源为主控芯片以及 UWB 收发模块持续提供电流。

2.2 UWB 无线收发模块设计

本文采用的无线收发模块 DWM1000 是由 Deca-wave 公司生产的芯片,物理层协议为 IEEE 802.15.4。该芯片具有高数据传输率、低功耗、抗干扰能力强、隐蔽性好、安全性高等特点。DWM1000 与主控芯片的连接方式如图 5 所示。

DWM1000 与 MCU 通过 SPI 协议进行通讯,并通过 SPI 接口对 DWM1000 进行 UWB 信号收发和工作模式的控制,所以 DWM1000 与 MCU 的连接只包括用于中断请求的 IRQ 和与 SPI 接口相关

的 SPICLK、SPIMISO、SPIMOSI、SPICsn。



用信息前的一串信号,可以将其理解为消息帧的防伪标识。它将提示接受芯片,随后发送的是有用信息,以免接受时丢失信号,一般用四个字节的常量 0X00。SFD(start of frame delimiter, 帧开始定界符),用于说明前导码部分已经结束,开始发送有效信息,一般为一个字节的常量 0XA7。PHR(PHY header, 物理头),在使用有效信息之前,定义一帧数据的长度,记录的值不包含该值本身的字节长度,但包含 MAC 协议数据单元中的帧校验序列的字节,开始此部分的发送时,DWM1000 将会开始记录该时刻的时间戳。

(4)Data(数据单元),存放通信中的有效信息,包括时间戳、距离值等数据,可以携带 127 个字节的

信息。

3.2 数据帧格式

数据帧中包含时间戳、距离、帧序号等信息,上位机通过对这些信息的解析和处理得到标签的位置坐标。数据帧的具体格式以及 IEEE 802.15.4 标准编码方式如图 8、图 9 所示。

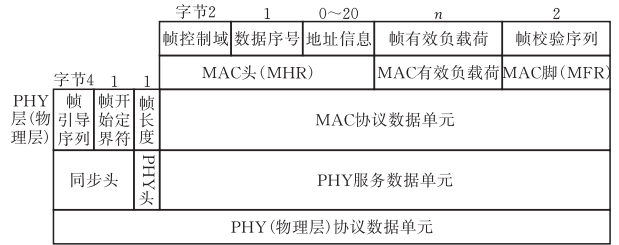


图 8 数据帧格式

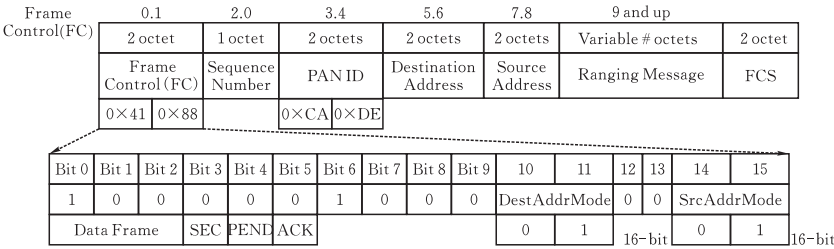


图 9 IEEE 802.15.4 标准编码

数据帧由 7 部分组成:1)第 0、1 字节,框架控制字节(Frame Control),用于定义数据帧的一些基本配置,例如地址长度、格式等,通常是用常量填充;2)第2 字节,序列号(Sequence Number),相当于数据帧的编号,它会随着发送的帧数递增;3)第 3、4 字节,PAN ID,是基于应用定义的常量,其值为 0XDECA;4)第 5、6 字节,目标地址(Destination Address),其值是唯一的,在程序代码中指定数据帧要发送的目标地址;5)第 7、8 字节,源地址(Source Address),同目标地址一样,可以在代码中指定接受的数据帧的源地址;6)从 9 字节开始,测距信息(Ranging Message),字节长度可以自由定义,用于存放测距值;7)最后两个字节,前面数据都存放完后,帧校验序列由 DWM1000 的硬件自动计算并

添加。

3.3 通信流程

本文使用三基站一标签的定位系统,通信流程包括:1)标签向基站发送 POLL 数据帧,并记录发送的时间 T1,基站负责接收 POLL 数据帧,并记录接收时间 T2;2)基站延迟发送 Response 数据帧,并记录发送时间 T3,标签负责接收 Response 数据帧,并记录接收时间 T4;3)标签发送 Final 数据帧,并记录发送时间 T5,基站负责接收发送 Final 数据帧并记录接收时间 T6。

通过处理标签和基站的发送时间和接收时间,可以得出信号在标签和基站之间的传输时间,并将这个传输时间乘以传输速度,就可以得到标签分别与 3 个基站之间的距离值。传输流程如图 10 所示。

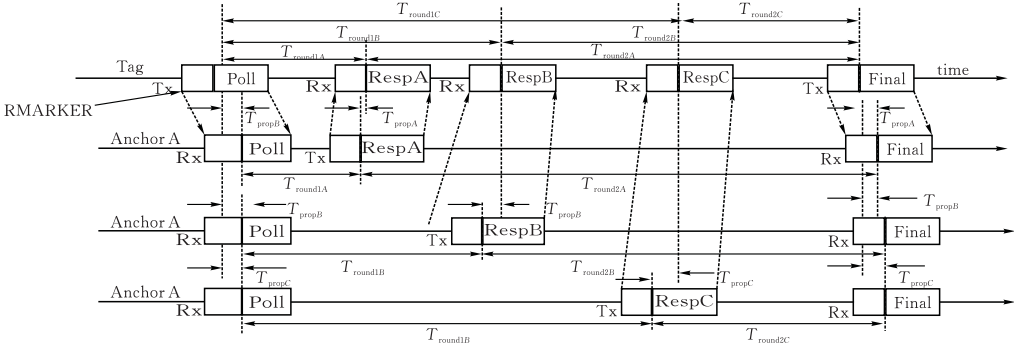
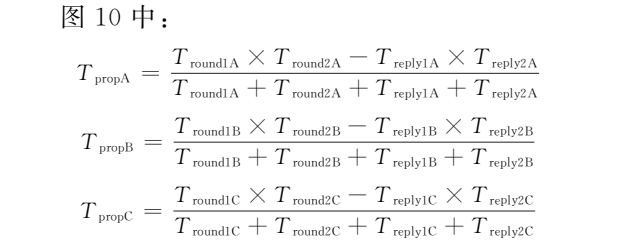


图 10 传输流程



4 实验与讨论

4.1 实验器材及环境

测试环境选取 4.8 m×6 m 的室内环境,实验的硬件(图 11)包括 4 个定位模块:用于供电的电源模块,USB-type-A 转 micio-USB 模块,以及 TTL 转 USB 模块。其中电源模块通过 USB-type-A 转 mi-cio-USB 给定位模块定位,TTL 转 USB 模块将数



图 11 硬件设备

据上传给上位机。搭建的室内定位环境(图 12)。3 个基站分别布

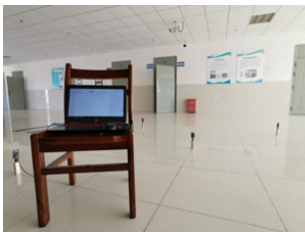


图 12 测试环境

4.2 静态试验

测试静态环境下 UWB 无线室内定位系统的定

位精度。将标签分别放置在 20 个不同测量点,进行

视距(LOS)环境和非视距(NLOS)环境下的测试。测量点分别为:三基站组成的三角形内部、三基站组

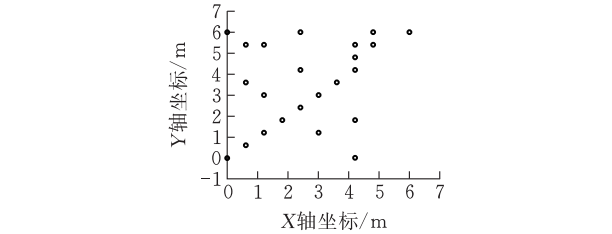


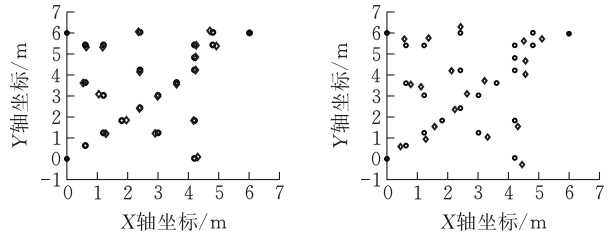
图 13 测量点分布



(a) 标签 (b) 基站

图 14 NLOS 环境

取平均值作为测量点的定位坐标,记录所有点的坐



(a) LOS环境 (b) LOS/NLOS环境

图 15 测量的定位坐标点分布

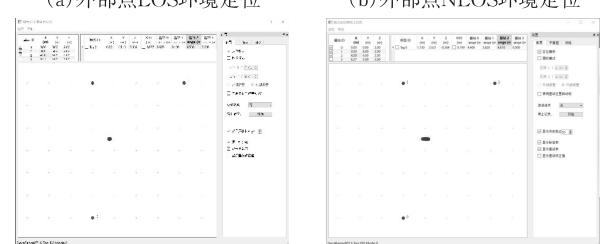
实验结果表明:LOS 环境下,测量精度较高,测

量误差可达到 8 cm 左右,即达到厘米级定位精

度;在 NLOS 环境下,测量精度较低,测量误差在

35 cm左右。

标签定位精度在上位机中显示对比如图 16



(a) 外部点LOS环境定位 (b) 外部点NLOS环境定位 (c) 内部点LOS/NLOS环境定位 (d) 外部点LOS/NLOS环境定位

图 16 标签定位精度在上位机中的显示

结果表明:在 LOS 环境下,上位机中标签位置点的坐标比较准确,标签重复定位误差可以达到 5 cm 左右;在 NLOS 环境下,上位机中标签位置的误差会较大,标签重复定位误差可以达到 30 cm 左右。

表 1 静态定位误差分析

编号	实际坐标	测量值		RMSE	
		LOS 环境	NLOS 环境	LOS 误差	NLOS 误差
1	(0.6,0.6)	(0.59,0.58)	(0.42,0.54)	0.03	0.19
2	(0.6,5.4)	(1.28,1.17)	(1.26,0.90)	0.09	0.31
3	(0.6,3.6)	(1.95,1.81)	(1.55,1.50)	0.15	0.39
4	(1.2,1.2)	(2.38,2.37)	(2.22,2.32)	0.04	0.20
5	(1.2,5.4)	(2.98,2.95)	(2.62,3.08)	0.05	0.39
6	(1.2,3.0)	(3.6,3.52)	(3.20,3.70)	0.08	0.41
7	(1.8,1.8)	(4.23,4.21)	(4.55,4.01)	0.03	0.40
8	(2.4,2.4)	(4.23,4.82)	(4.55,4.65)	0.04	0.38
9	(2.4,6.0)	(4.25,5.38)	(4.50,5.60)	0.05	0.36
10	(2.4,4.2)	(4.92,5.35)	(5.10,5.70)	0.13	0.42
11	(3.0,3.0)	(4.70,6.07)	(5.10,5.70)	0.12	0.42
12	(3.0,1.2)	(2.35,6.03)	(2.41,6.28)	0.06	0.28
13	(3.6,3.6)	(1.18,5.30)	(1.35,5.75)	0.10	0.38
14	(4.2,4.2)	(2.90,1.18)	(3.30,1.00)	0.10	0.36
15	(4.2,4.8)	(4.30,0.06)	(4.44,-0.32)	0.12	0.40
16	(4.2,5.4)	(4.17,1.80)	(4.30,1.50)	0.03	0.32
17	(4.2,0.0)	(0.63,5.31)	(0.55,5.70)	0.09	0.30
18	(4.2,1.8)	(1.04,3.05)	(1.10,3.41)	0.17	0.42
19	(4.8,5.4)	(2.39,4.12)	(2.11,4.18)	0.08	0.29
20	(4.8,6.0)	(0.53,3.58)	(0.76,3.52)	0.07	0.18
平均	N/A	N/A	N/A	0.08	0.34

4.3 动态试验

使用如图 17 所示的全自动小车作为定位目标,将标签固定在小车车身上,通过控制小车的运动来测试 UWB 在动态环境下的定位精度。

以小车的真实行驶轨迹不完全平行于坐标轴,而是与坐标轴有一定偏角。

对小车的行驶轨迹和定位误差分析如图 19 所示。

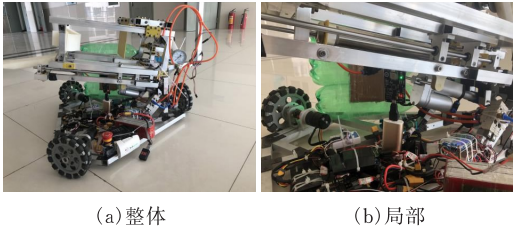


图 17 全移动小车

控制小车以 2 m/s 的速度在室内环境下匀速直线行驶。由于小车车身上较多的零部件会对定位造成干扰,因此可认为是 NLOS 环境。让小车分别沿 x 轴方向和 y 轴方向行驶,其行驶轨迹在上位机上显示见图 18。

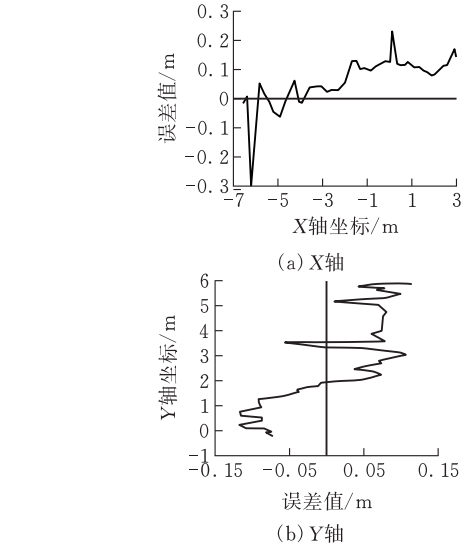


图 19 小车的行驶轨迹和定位误差

图 19 表明:小车沿 X 轴方向运动时,轨迹误差最大值小于 30 cm,平均误差在 15 cm 左右;沿 Y 轴运动时,轨迹误差最大值小于 12 cm,平均误差在 10 cm 左右。小车在运动时,人工校直、路面情况、环境噪声等因素都会对小车行走产生影响,导致额外的定位误差。以上因素对动态定位的影响大约在

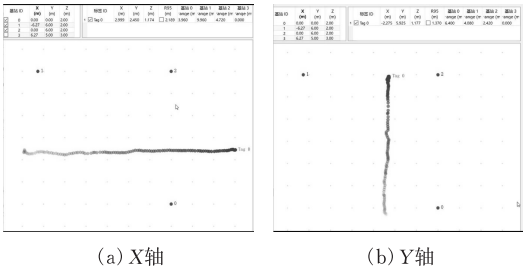


图 18 小车行驶轨迹

小车初始位置由人工摆放,会有一定的误差,所

5 cm 左右,因此,定位系统的直线动态定位误差在 10 cm 左右。

5 结 论

本文从定位原理、硬件模块、软件模块这三个方面进行研究,搭建基于 UWB 的室内无线定位系统。以 STM32 芯片作为主控芯片,DWM100 作为无线收发模块;基于三边定位算法,运用相交质心定位算法,设计了定位软件,并在上位机上可视化显示出标签和基站的位置坐标。实验结果表明:在 LOS 环境下,静态定位精度可达到 8 cm,动态定位精度可达到 10 cm 左右,相较于文献[16]的室内无线定位系统所获取的目标节点坐标与实际坐标误差,本文的定位精度提升了 33.3%~46.7%。此外,本文还在 NLOS 环境下进行了实验,NLOS 环境下定位平均误差在 35 cm 以内。

[参 考 文 献]

[1] 罗鹏. 基于蓝牙 4.0 基站角度测量的室内定位技术研究[D].杭州:浙江大学,2016.

[2] 李自良,韩笑,李硕,等.基于超宽带的室内定位技术[J].数字通信世界,2018(8):40.

[3] Yang C, Shao H. WiFi-based indoor positioning[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 150-

157.

[4] Li X M, Lu X. Design of a ZigBee wireless sensor network node for aquaculture monitoring; 2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)[C]. Chengdu, 2016: 2179-2182.

[5] 周惇. 基于射频识别的室内定位系统研究[D].西安:电子科技大学,2013.

[6] 张成,田建艳,吕迎春,等.基于超声波测距的高精度室内位置感知系统研究[J].仪表技术与传感器,2018(1):71-75.

[7] 潘宗鹏,柴洪洲,董冰泉,等.实时 GPS 精密卫星钟差估计及实时精密单点定位[J].海洋测绘,2015,35(5): 12-15,19.

[8] 安宝强,张浩,崔学荣.单基站 UWB 定位距离的获得及处理方法[J].现代电子技术,2014,37(7):15-17,20.

[9] 边江南. UWB 室内定位算法的研究[D].南昌:南昌航空大学,2013.

[10] 黄月天.超宽带室内定位关键技术分析[J].电子制作, 2020(Z2):40-41,84.

[11] 方震,赵湛,郭鹏,张玉国.基于 RSSI 测距分析[J].传感技术学报,2007(11):2526-2530.

[12] 张团善,何颖.卡尔曼滤波在两轮自平衡代步车姿态检测中的应用[J].单片机与嵌入式系统应用,2014,14(5):33-35.

[13] 李绍军. 基于 UWB 的 LOS/NLOS 测距定位方法研究[D].武汉:湖北工业大学,2017.

Design of Indoor Wireless Positioning System Based on UWB

XU Wan, TU Tuo, HU Tianyu, HU Xinyu

(School of Mechanical Engin., Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

Abstract: Aiming at the problems of strong dynamics, short transmission distance, poor anti-multipath effects, poor positioning accuracy, and complex indoor environment in indoor positioning, a wireless positioning system based on ultra wideband (UWB) was designed. The time of flight between the tags was used to measure the distance between the base station and the tag, and this distance value was uploaded to the host computer. The host computer calculated the tag position coordinates through a weighted centroid algorithm. Static and dynamic experiments were performed in an indoor environment to analyze the positioning error of the positioning system in line-of-sight and non-line-of-sight situations. The experimental results show that the positioning accuracy of the UWB wireless positioning system is high, which can be as high as about 10cm in the case of indoor line-of-sight, and in the non-line-of-sight environment, the positioning accuracy is about 30cm due to the large interference.

Keywords: Indoor positioning ;UWB; centroid algorithm; positioning error

[责任编辑: 张 众]