

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108282

室内机器人 TDOA 异步无参测距定位方法研究*

冷加俊 马国军

(江苏科技大学电子信息学院 镇江 212003)

摘要: 针对超宽带室内机器人定位系统中 TDOA 的时钟难以同步以及测量存在各种干扰问题,提出一种室内机器人 TDOA 异步无参测距的定位新方法。该方法将实际测量计算而来的时间作为校正因子,为主基站构建异步时钟下无参考节点的测距算法模型,由主、从基站的测量信息可直接计算出机器人到达距离差;提出关联权值滤波算法获得到达距离差状态矩阵,有效降低信号干扰。并从测量性能、测距及定位等方面进行误差分析。实验结果表明,测距精度 98% 维持在 10 cm 以内,且不会随着长时间运行发生测量偏移,具有较好的定位精度,可满足室内机器人的定位需求。

关键词: 超宽带;到达时差;异步无参测距;关联权值滤波;室内定位

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Research on indoor robot TDOA asynchronous no reference ranging location method

Leng Jiajun Ma Guojun

(School of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of synchronizing the clock of TDOA in the ultra-wideband indoor robot positioning system and the various interference problems in measurement, a new method for indoor robot TDOA asynchronous non-reference node ranging is proposed. This method uses the time calculated from the actual measurement as a correction factor to construct a ranging algorithm model for the master base station without a reference node under an asynchronous clock. The measurement information of the master and slave base stations can directly calculate the robot's arrival distance difference; propose an association weight The new algorithm of value filtering combines the moving average to obtain the arrival distance difference state matrix, which effectively reduces signal interference. And from the measurement performance, ranging and positioning and other aspects of error analysis. Experimental results show that 98% of the ranging accuracy is maintained within 10 cm, and measurement deviation will not occur with long-term operation, and it has good positioning accuracy, which can meet the positioning needs of indoor robots.

Keywords: UWB; TDOA; asynchronous non-reference node ranging; associated weight filtering; indoor positioning

0 引言

随着技术的迭代更新,机器人在各个行业逐渐凸显其不可替代的优势。在机器人领域中,室内移动机器人方向是一个巨大的挑战^[1]。目前,移动机器人的室内定位技术主要有:WiFi^[2]、蓝牙^[3]、超宽带(ultra-wideband, UWB)、视觉^[4]、激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)^[5]及其融合技术^[6]。UWB技术是近年来新兴的一种定位方法,具有很宽的频偏^[7],能够发挥其低功耗、高精度且不失实时性的优势,尤其是基于时间的 TDOA 定位,能够满足

室内移动机器人的定位需求。

国内外学者针对 UWB-TDOA 定位做出很多的研究,文献[8]提出联合 TDOA 和 SDS-TWR 的测距方案,比起单一 SDS-TWR 明显耗时减小,但是精度提高不大且随着节点增多导致通信负担增加。文献[9]通过分析 TDOA 的误差源采用线性插值及卡尔曼滤波(Kalman filter, KF)提升定位精度,但随着周期增加,线性插值增加了延迟,同时 KF 增加算法复杂度。文献[10-11]提出并使用开源 TDOA 时钟同步定位方法,采用时钟偏移和漂移为每个时钟建模,更新模型的状态进而实现时钟同步,虽然降低了通信负载,

收稿日期:2021-11-06

* 基金项目:国家自然科学基金(61371114)、镇江市科技计划重点研发社会发展项目(SH2020015)资助

但却需要大量基站来提高精度。文献[12]通过融合分解进行信息过滤来提升 TDOA 定位精度,但是计算量增加。文献[13-14]设计了异步节点感知模型 Async-TDOA 来简化数据通信方式,在保证精度的前提下提高可靠性,但是需要引入参考节点保证时钟同步。文献[15]采用 TOF 和 TDOA 联合定位算法提高定位精度,但是算法中随着基站的增多也会增加主基站的计算量,不利于实时性。

为了能够降低通信复杂度降低功耗,同时提高测量可靠性,并提高测距值测量精度,本文设计无需参考节点且无需结合其它传感器即可获取高精度、低成本的异步无参 UWB-TDOA 测距的定位方法。首先,通过分析系统模型构建无参测距的通信方案;然后,深入研究提出的无参测距算法及关联滤波算法,并进行多个实物基站进行测量分析,通过 Chan 算法对测试点进行验证,完成最终的 UWB 室内机器人定位;最后,进行了总结与展望。

1 系统模型

1.1 TDOA 测量定位原理

实现室内无线环境中机器人的 UWB 定位,不仅需要高精度设计方案,还需要能够实时计算的测量模型及算法^[16]。本文设计的 UWB-TDOA 定位系统主要包括 4 个基站和一个移动标签,其中基站分为 1 个主基站和 3 个从基站。每 2 个基站和 1 个定位标签之间的位置关系可构成 1 条双曲线,通过两条双曲线的交点即可确定标签的位置,如图 1 所示。

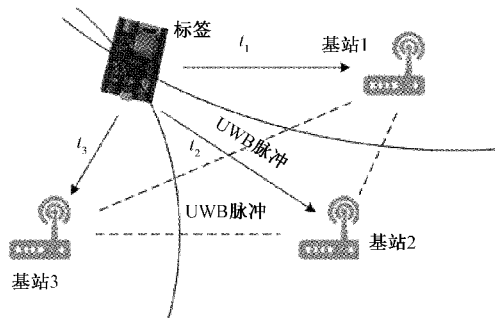


图 1 TDOA 测量原理

在三维空间中,目标的实际坐标 $s = [x, y, z]^T$ 。假设共有 N 个 UWB 模块设置为基站进行测量,则第 i 个基站的实际坐标 $M_i = [x_i, y_i, z_i]^T, (i = 1, 2, \dots, N)$ 。基站坐标已知,为方便推导,本文公式均在二维空间下计算。定位标签发送定位信息时,每个基站通过测量目标标签的时间 $t_i (i = 1, 2, \dots, N)$,则由 TDOA 算法原理可得:

$$\hat{d}_{i,1} = c\Delta\hat{t}_{i,1} = c(\hat{t}_i - \hat{t}_1) \quad (1)$$

式中: $\hat{d}_{i,1}$ 为基站 $i (i = 2, 3, \dots, N)$ 和基站 1 之间测量的到达距离差值, c 为信号传输速度。实际到达距离差可通过系统基站的实际坐标值计算获得:

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

式中: R_i 为第 i 个基站和日标之间的欧氏距离。

实际测量值可表示为:

$$\hat{d}_{i,1} = \sqrt{(x_i - \hat{x})^2 + (y_i - \hat{y})^2} - \sqrt{(x_1 - \hat{x})^2 + (y_1 - \hat{y})^2} \quad (3)$$

式中: (\hat{x}, \hat{y}) 为计算出的估计坐标。简单起见,记为:

$$\begin{aligned} \hat{d} &= [\hat{d}_{2,1}, \hat{d}_{3,1}, \dots, \hat{d}_{N,1}]^T \\ d &= [d_{2,1}, d_{3,1}, \dots, d_{N,1}]^T \\ \text{其观测矢量可表示为:} \\ \hat{d} &= d + r \end{aligned} \quad (4)$$

式中: r 为满足零均值高斯分布的测量误差。

1.2 异步无参测距模型

正常 TDOA 定位方法需要引入参考节点,通过参考节点周期性的发射时钟同步信号,每个基站都需要进行时钟同步,虽然能够达到室内定位需求但增加了成本、通信复杂度以及基站的功耗。为了避免不必要的复杂条件,本文构建了新的测距方案。考虑到室内环境和机器人的特征,本文提出的定位系统结构方案如图 2 所示,包含上位机数据处理中心、数据中继、基站、附带定位标签的机器人。

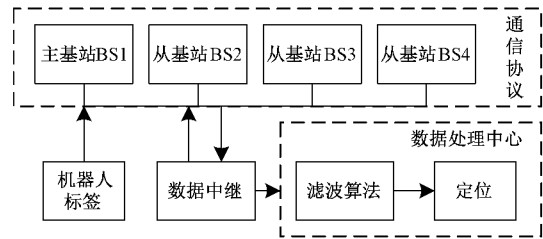


图 2 定位系统模型

图 3 为定位系统中实现测量数据传输的整体流程,首先由定位标签自身发射定位信号,唤醒主基站;然后,主基站开始轮询各从基站,基于各从基站的时钟模型,进行 TDOA 测量计算。当轮询完最后一个从基站后,主基站将所有测量数据通过数据中继上传至数据处理端进行集中处理;最后将处理后的数据以及各个基站的已知坐标进行计算,利用定位算法模型进行机器人位置坐标解算,实现最终定位。

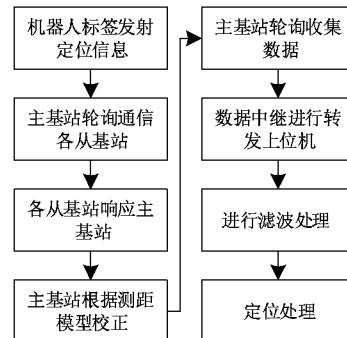


图 3 定位通信流程

本文的异步无参测量方案无需要引入参考节点,提高通信效率,且机器人标签只需发射信号即可,为主基站建立时钟模型,在收到定位信息时实时更新测量值,无需基站周期性时钟同步,降低功耗的同时,增加基站和机器人标签的使用寿命。

2 算法分析

2.1 异步测距算法

通过 1.2 节提出的通信方案模型,获取主基站和从基站接收的到达时间戳,以测量基站间距离作为校正因子,主基站的时钟作为中间参考时钟,实现全局基站时钟校准。

异步无参测量的原理如图 4 所示,定位节点在任意时刻发送定位信息,主基站和从基站记录各自接收的到达时间 t_m 和 t_s ,主基站 BS1 立即与从基站轮询通信,并记录自己的发送时间 t_{m1} 和 t_{m3} 、接收时间 t_{m2} ;从基站 BS2 与主基站通信时记录自己的发送时间 t_{mid}^2 、接收时间 t_{s1}^2 和 t_{s2}^2 ,将所有时间戳打包发送给主基站。主基站获得数据后即可执行异步测距算法,求得与 BS2 间的 TDOA 测量值。

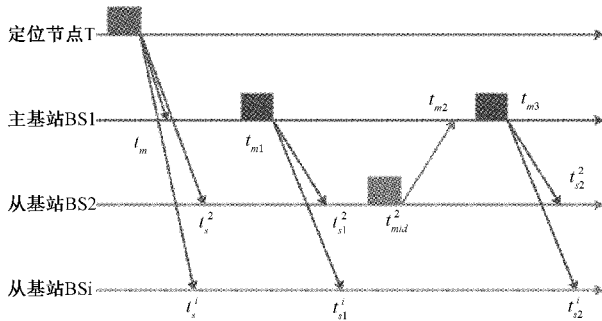


图 4 异步无参测距原理

相对于两个 UWB 模块来说,包含晶振误差和天线延迟误差的时钟模型可以近似为:

$$t_m = kt_s + \gamma \quad (5)$$

式中: k 为校正模块相对于参考时钟的归一化频率,大小约为 1, γ 为该模块相对于参考时钟的时间偏移量。

如式(5)所示,在从基站中,加性噪声即时间偏移量是可以消除的,根据图 4 设计的测距原理,主基站和从基站通过两次收发的时间戳来计算该从基站的时钟归一化频率 k ,得到:

$$k^i = (t_{ms} - t_{m1}) / (t_{s2}^i - t_{s1}^i) \quad (6)$$

式中: k^i 为第 i 个基站的归一化频率。由于主、从基站坐标均已知,主、从基站之间的信号飞行时间 t_{BSi1} ($i = 2, 3, \dots, N$) 即校正因子可直接测量计算获得,由此可以计算出信号在实际环境中的时间和参考时间之间的归一化频率 λ 满足:

$$(t_{m2} - t_{m1}) - k^2(t_{mid}^2 - t_{s1}^2) = 2\lambda t_{BS21} \quad (7)$$

由式(6)和(7)两个时钟归一化频率得到移动目标到两个标签的 TDOA 值,需要满足:

$$k^i(t_{s1}^i - t_s^i) - \lambda t_{BSi1} = (t_{m1} - t_m) + \lambda \Delta t \quad (8)$$

两边同乘以信号的传播速度,化简后可得异步测距模型:

$$\Delta d_i = \frac{k^i(t_{s1}^i - t_s^i) - (t_{m1} - t_m)}{(t_{m2} - t_{m1}) - k^2(t_{mid}^2 - t_{s1}^2)} \times 2d_{BS21} - d_{BSi1} \quad (9)$$

式中: d_{BSi1} 为从基站 BSi 到主基站 $BS1$ 的实际距离用来直接作为校正因子, t_{sk}^i 为通信步长内从基站 i 记录的第 k 步的时间戳。由此,可直接获得定位目标到两个基站之间的距离差 Δd_i 。

该方法同时考虑了主基站与实际信号传播的时钟校正,提高了测量的准确性和稳定性,降低了距离计算的复杂度,同时降低各基站的通信频率。

2.2 关联权值滤波算法

针对异步无参测距值可能存在异常值过大和测量不稳定,提出关联权值滤波算法。首先采用滑动平均^[17]进行异常值筛选,超出一定阈值即进行补偿,然后采用双重高斯权值进行滤波,该算法是一种非线性滤波器,可以达到保持比重、降噪的效果^[18]。关联高斯权值滤波是本文基于双边滤波算法^[19]的思想做出的创新,本文中采用加权计算,将其优化为临近度计算的权值和测距值之间关联度计算的权值的乘积,优化后的权值再与测距值作卷积和运算。

临近度由测距值到中心的距离决定,权值可计算为:

$$\omega_d(d_{i,1}, d_{i,j}) = \exp\left(-\frac{(d_{i,1} - d_{i,j})^2}{2\delta_d^2}\right) \quad (10)$$

其中, $d_{i,1}$ 表示当前基站 i 测量计算的到达距离差, $d_{i,j}$ 表示该基站当前窗口的测距中心值, δ_d 表示高斯函数的方差。

关联度为当前时间各个基站测距值占总数的比例,权值可计算为:

$$\omega_\epsilon(\epsilon_{i,1}, \epsilon_{i,j}) = \exp\left(-\frac{(\epsilon_{i,1} - \epsilon_{i,j})^2}{2\delta_\epsilon^2}\right) \quad (11)$$

其中, $\epsilon_{i,1}$ 表示当前基站测量值在所有基站测量中的比值, $\epsilon_{i,j}$ 表示当前基站在测量值窗口中的中心值, δ_ϵ 表示高斯函数的方差。

将上述两个权值进行相乘即可获得关联权值滤波的总权值。

2.3 定位算法

本文采用 Chan 算法^[20]通过式(3)对测量的到达距离差进行求解验证,展开可获得:

$$\hat{d}_{i,1}^2 + 2\hat{d}_{i,1}d_1 = K_i - 2x_{i,1}\hat{x} - 2y_{i,1}\hat{y} - K_1 \quad (12)$$

式中: $K_i = x_i^2 + y_i^2$, $x_{i,1} = x_i - x_1$, $y_{i,1} = y_i - y_1$, ($i = 1, 2, \dots, N$) 构建以 $z = [\hat{x}, \hat{y}, d_1]$ 为变量的方程:

$$h = Gz \quad (13)$$

用矩阵形式表达为:

$$\mathbf{h} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} K_2 - K_1 - \hat{d}_{2,1}^2 \\ K_3 - K_1 - \hat{d}_{3,1}^2 \\ \vdots \\ K_N - K_1 - \hat{d}_{N,1}^2 \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_N - x_1 & y_N - y_1 \end{bmatrix}$$

假设 z 中元素相互独立, 则其最大似然估计:

$$\mathbf{z} = (\mathbf{G}^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{h} \quad (14)$$

式中: $\boldsymbol{\Psi}$ 可以表示为 $\boldsymbol{\Psi} = E(\boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{\Psi}^T) = c^2 \mathbf{B} \mathbf{Q} \mathbf{B}$, $\mathbf{B} = \text{diag}\{d_2^0, d_3^0, \dots, d_N^0\}$, d_i^0 为 $d_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 在无噪声条件下的表达, \mathbf{Q} 为 TDOA 的协方差矩阵, c 为信号传播速度。利用式(14)对 z 进行一次近似 WLS 估计。

根据 d_1 关系再次构造方程进行二次 WLS 估计如式(15)所示。

$$\Delta \mathbf{z} = (\mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\Psi}_1^{-1} \mathbf{G}_a)^{-1} \mathbf{G}_a^T \boldsymbol{\Psi}_1^{-1} \mathbf{h}_1 \quad (15)$$

其中:

$$\Delta \mathbf{z} = [(x - x_1)^2 \quad (y - y_1)^2]^T, \mathbf{G}_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{h}_1 = \begin{bmatrix} (\Delta z_1 - x_1)^2 \\ (\Delta z_2 - y_1)^2 \\ \Delta z_3 \end{bmatrix}, \Delta z_i \text{ 表示 } \Delta \mathbf{z} \text{ 的第 } i \text{ 个分量}, \boldsymbol{\Psi}_1 =$$

$4\mathbf{B}_1 \text{cov}(z)\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_1 = \text{diag}\{\hat{x} - x_1, \hat{y} - y_1, \hat{d}_1\}, \text{cov}(z) = (\mathbf{G}_a^{0T} \boldsymbol{\Psi}^{-1} \mathbf{G}_a^{0T})^{-1}, \mathbf{G}_a^0$ 是无噪声下的 \mathbf{G} , 由 z 计算出 \hat{d}_i 代入获取, 最终获取目标定位坐标为:

$$\mathbf{z} = \pm \sqrt{\Delta \mathbf{z}} + \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

3 实验分析

为验证本文 UWB-TDOA 方法在室内环境下测量的结果对定位性能的提升, 本节采用 NodeMCU BU01 开发板对本文 TDOA 测量方法的测距精度、稳定性以及对机器人室内定位的精度进行验证。

3.1 实验环境

UWB 定位系统的基站模块是由 UWB 收发器模组组成, 如图 5(a)所示, 该模组是基于 Decawave 的 DW1000 芯片设计, 集成了板载天线、RF 电路、电源及时钟电路, 支持 3.5~6.5 GHz 的 4 个信道。实验室内环境为 5 m×6 m 的空间, 如图 5(b)室内环境复杂, 符合实际的应用场景。实验总共设置 4 个基站安装在支架上, 分别布置于 4 个角落, 为了避免过多的非视距(non line of sight, NLOS)环境影响, 将基站的高度均布置高于 1.5 m。需要定位的 UWB 模块依附于机器人上方, 如图 5(c)所示, 该机器人可依据上位机指令进行移动。

为避免复杂计算, 该定位系统采用坐标系是以主基站(BS0)为平面坐标原点, 三维空间的原点是以 BS0 正下方的地平线, 各个基站以及机器人定位测试点的布局如图 6 所示。

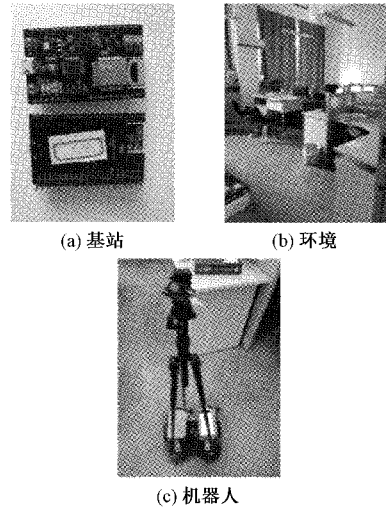


图 5 实验设备及环境

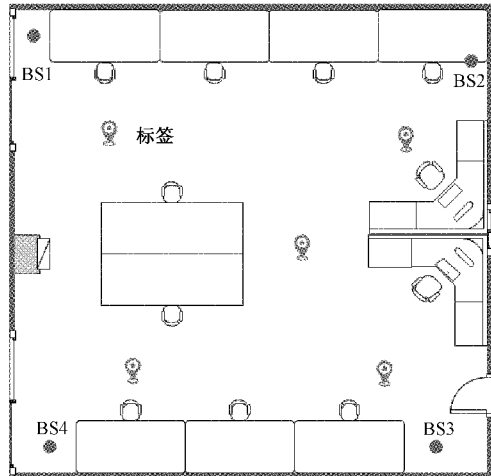


图 6 实验布局

3.2 通信性能分析

与相关主流的 TDOA 测量的通信方法相比较, 本实验的优化测量方案在室内环境下实现通信, 充分利用了系统的信道容量, 减少通信次数, 同时保证一定的测量精度。

表 1 给出了进行 1 次定位时所进行通信的性能对比。其中 N 表示所需基站的个数, N 一般 ≥ 4 , T-TDOA 为在参考定位标签的系统中实现 TDOA 测量, R-TDOA 为在参考基站的系统中实现 TDOA 测量, 表 1 中各数据分别代表每个标签的通信数。

表 1 TDOA 测量性能对比

方法	标签	参考基站	基站
T-TDOA	$N+1$	2	$4N$
R-TDOA	2	$2N+2$	$4N$
本文方法	1	0	$4N+2$

通过整合 3 种方法的所有通信量,在 $N \geq 4$ 的情况下,本文的优化方法无需引入参考节点,总通信量明显低于其他方法,无需周期性时钟同步,在接收定位信号时实现时钟校正和定位计算,确保了系统的实时性和稳定性。

3.3 测距分析

在第 2.1 和 2.2 节的推导中,通过异步无参测距算法测得数据并使用关联滤波算法进行测距值滤波,使用该方法测量的定位数据非常稳定,当然,由于硬件原因和室内无线环境的干扰,存在异常值是不可避免的。如图 7 所示,测距值主要保持在稳定的范围内,不存在测距偏移的现象,在测距值中也存在个别跳动幅度较大的异常值,使得测距误差超出 ± 30 cm。关联滤波后的测距值使得测距值的稳定程度和精度均大幅提升,如图 8 所示,测距精度保持在 5 cm 左右。

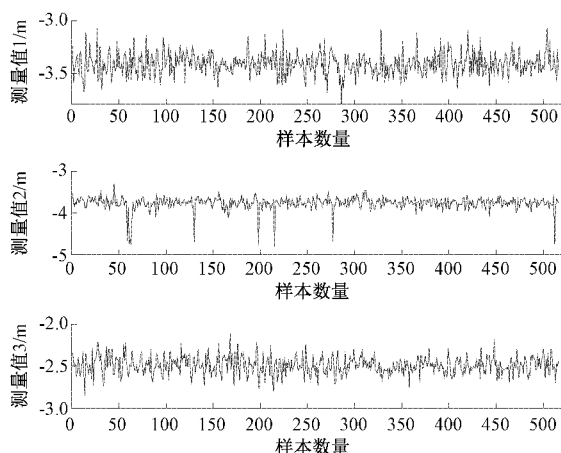


图 7 无参测距原始数据

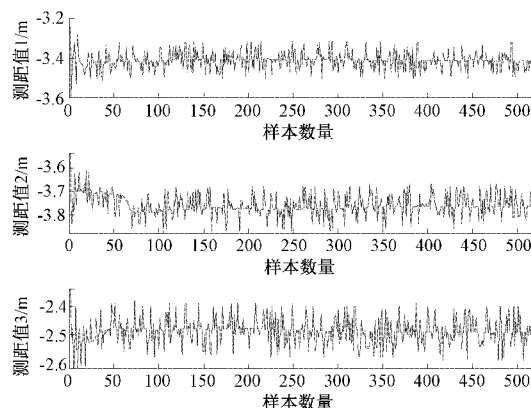


图 8 关联滤波后的数据

表 2 给出在视距环境下本文各方法所测得数据,结合图 8 和表 2 可以看出,经过改进双边滤波处理后的误差均方根明显更小,具备较强的降噪能力。

图 9 为关联滤波算法前后均方根累积分布对比。可以看出,在无噪声影响的的环境中,由于在算法中引入了实际飞行时间和 UWB 模块之间信号传输的归一化频率,异步无参测距算法的误差都稳定在 30 cm 以内,消除了时钟频偏的误差,而在关联滤波后,测距性能大幅提升,使测距效果稳定度增加,98%测距值的精度维持在 10 cm 以内,同时使得测距精度提升了 30%左右,满足室内机器人定位的需求。

3.4 定位分析

为了分析本文算法对定位结果的影响,对 3.3 节的测距结果进行进一步 Chan 算法定位分析,不考虑高度方向的误差,定位结果以二维形式展示,如图 10 所示,相比较

表 2 本文滤波性能对比

方法	数据	误差范围	均方根误差	均值
本文原始数据	TDOA1	(-3.792 2, -3.072 2)	0.109 5	-3.409 0
	TDOA2	(-4.800 0, -3.310 0)	0.166 3	-3.765 5
	TDOA3	(-2.860 0, -2.110 0)	0.112 0	-2.490 8
改进双边滤波	TDOA1	(-3.592 2, -3.242 2)	0.044 4	-3.411 7
	TDOA2	(-3.823 5, -3.540 0)	0.047 0	-3.758 1
	TDOA3	(-2.565 3, -2.340 0)	0.046 5	-2.488 5

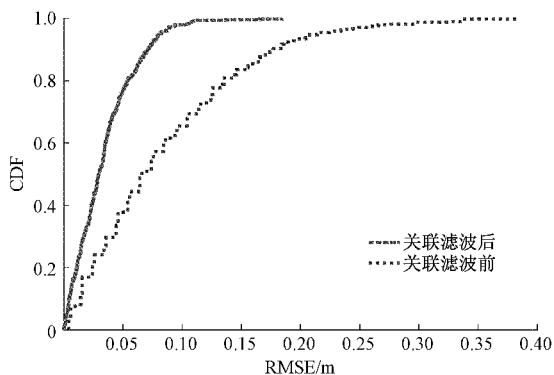


图 9 关联滤波前后精度对比

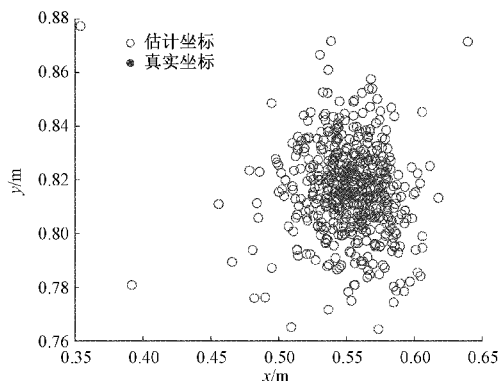


图 10 定位精度分析

真实坐标点,有 98%的定位坐标精度保持在 ± 5 cm 以内。实验结果表明,本文提出的测距算法和关联滤波算法能够满足室内机器人的定位需求,具有高精度、高稳定性的优点。

4 结 论

在室内复杂环境下实现机器人对位置感知的需求,本文提出在无线条件下实现 UWB-TDOA 异步无参测距的室内机器人定位方法。设计了无线条件下基于 UWB-TDOA 异步无参测量的基站通信方案,在主基站中采用异步无参测距算法对每个从基站采样,一步更新测距值,并提出关联权重滤波算法,结合移动平均,对异步无参测距算法的测量值进一步校正优化,极大提升测量的稳定性及精度,主要测距精度维持在 10 cm 以内且定位精度也能达需求。本文提出的方法在减少通信复杂度的同时,能够保证定位的实时性以及稳定性,提升定位精度,同时也为多节点及多机器人目标定位提供新思路。

目前,即便 UWB 具有较高的定位精度,但还是要考虑硬件的限制以及环境等多方面的影响,定位方法上还需要进一步改进和优化。

参考文献

- [1] 刘华平,郑向梅,孙富春. 基于雷达信息的室内移动机器人的方位估计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018,58(7):609-613.
- [2] 胡久松,刘宏立,肖郭璇,等. 应用于 WiFi 室内定位的自适应仿射传播聚类算法[J]. 电子与信息学报,2018,40(12):2889-2895.
- [3] 陈伟. 蓝牙定位技术的探讨及测试[J]. 国外电子测量技术,2020,39(10):143-146.
- [4] 孙森震,李广云,冯其强,等. 可见光通信与双目视觉的室内定位[J]. 光学精密工程,2020,28(4):834-843.
- [5] 周治国,曹江微,邸顺帆. 3D 激光雷达 SLAM 算法综述[J]. 仪器仪表学报,2021,42(9):13-27.
- [6] 胡钊政,刘佳蕙,黄刚,等. 融合 WiFi、激光雷达与地图的机器人室内定位[J]. 电子与信息学报,2021,43(8):2308-2316.
- [7] ZAFARI F, GKELIAS A, LEUNG K K. A survey of indoor localization systems and technologies[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3):2568-2599.
- [8] 尹秋园,余慧敏. TDOA/SDS-TWR 联合的超宽带室内测距[J]. 电子测量技术,2021,44(4):75-79.
- [9] MCELROY C, NEIRYNCK D, MCLAUGHLIN M. Comparison of wireless clock synchronization algorithms for indoor location systems[C]. 2014 IEEE International Conference on Communications Workshops(ICC), IEEE, 2014: 157-162.
- [10] TIEMANN J, ECKERMANN F, WIETFELD C. Atlas-an open-source Tdoa-based Ultra-wideband localization system[C]. 2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation(IPIN), IEEE, 2016: 1-6.
- [11] TIEMANN J, ECKERMANN F, WIETFELD C. Multi-user interference and wireless clock synchronization in TDOA-based UWB localization[C]. 2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation(IPIN), IEEE, 2016: 1-6.
- [12] 苗晟,董亮,何丽波,等. 一种基于信息过滤的无线电定位方法[J]. 国外电子测量技术,2014,33(3):31-34.
- [13] 薛源,苏伟,王洪超,等. 支持异步 TDOA 测量的确定性定位网络[J]. 电子学报,2019,47(10):2017-2024.
- [14] XUE Y, SU W, WANG H, et al. A model on indoor localization system based on the time difference without synchronization[J]. IEEE Access, 2018, 6:34179-34189.
- [15] 张俞,冷璐. 基于图优化的蓝牙信标室内定位方法[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(6):45-50.
- [16] 李荣冰,王念曾,刘建业,等. 面向相对导航的 UWB 测距误差估计与补偿方法[J]. 仪器仪表学报,2019,40(5):28-35.
- [17] 包为民,沈丹丹,倪鹏,等. 滑动平均差检测法的提出及验证[J]. 地理学报,2018,73(11):2075-2085.
- [18] 熊昌镇,王润玲,邹建成. 基于多高斯相关滤波的实时跟踪算法[J]. 浙江大学学报(工学版),2019,53(8):1488-1495,1562.
- [19] 杨旭,徐璐,杨成华,等. 基于联合双边滤波的高质量关联成像[J]. 光学学报,2020,40(14):85-92.
- [20] 张然,宋米亮,冉龙俊. 一种基于非视距误差补偿的协同定位算法[J]. 北京航空航天大学学报,2017,43(7):1426-1432.

作者简介

冷加俊,硕士研究生,主要研究方向为超宽带室内定位。

E-mail:jiajunlen@163.com