

基于 UWB 技术的晶圆传输机器人定位优化算法

刘傲林, 荆学东

(1. 上海应用技术大学 电气与工程学院 上海 201418)

摘要: 目前对于移动平台传统的激光定位技术不仅造价高昂, 并且工作中容易受到障碍物的遮挡无法识别, 另外还会因为环境光的变化影响定位精度。针对晶圆搬运的定位问题, 采用基于飞行时间 (TOF) 的方法, 设计了一个基于超宽带技术的晶圆搬运平台定位系统, 解决了传统激光定位容易遮挡与环境光影响的问题。同时针对基础单边双向测距 (SS-TWR) 算法微控制器 MCU 主频偏差的问题, 利用改进后的双边双向测距 (DS-TWR) 算法实现搬运平台的三边定位方式, 消除了因主频偏差导致的累积误差。搭建仿真实验平台, 测试 SS-TWR 和 DS-TWR 算法的 UWB 定位技术的定位轨迹, 并与传统激光定位技术进行误差比较和数据分析, 实现了在成本更低的情况下相近定位精度的晶圆移动平台定位功能。

关键词: 超宽带技术; 晶圆传输机器人; 室内定位; 移动平台定位; 三边定位; 预对准方法; 轨迹追踪; 双向测距
中图分类号: TN911.23-34 文献标识码: A

Wafer transfer robot positioning optimization algorithm based on UWB technology

LIU Aolin, JING Xuedong

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: At present, traditional laser positioning technology for mobile platforms is not only expensive, but also prone to being obstructed by obstacles and unable to recognize during operation. In addition, the positioning accuracy is also affected by changes in ambient light. For the positioning problem of wafer handling, a wafer handling platform positioning system based on c(UWB) technology is designed by means of the time-of-flight (TOF) method, which solves the problem that traditional laser positioning is easy to obstruct and affect the ambient light. At the same time, in allusion to the problem of microcontroller unit (MCU) main frequency deviation in the basic single-sided two-way ranging (SS-TWR) algorithm, the improved double-sided two-way ranging (DS-TWR) algorithm is used to realize the trilateral positioning mode of the handling platform, so as to eliminate the accumulated error caused by the main frequency deviation. The simulation experimental platform is built to test the positioning trajectory of UWB positioning technology based on SS-TWR and DS-TWR algorithms, and compare the error and data analysis with traditional laser positioning technology, achieving wafer mobile platform positioning function with similar positioning accuracy at lower cost.

Keywords: ultra-wideband technology, wafer transfer robot; indoor positioning; mobile platform positioning; trilateral positioning; pre-alignment method; trajectory tracking; bidirectional ranging

0 引言

目前, 对于鉴定晶圆机器人搬运平台的定位技术能力高低有多个参数指标, 满足这些特性才能够保证平台在移动时稳定且有效地实时跟踪领航目标。首先, 最重要也是最需要的关键特性便是更高的精准度, 良好的定位技术可以更加精确的检测到目标, 并分析计算出其位置信息并反馈。其次, 在满足精度要求的前提下, 更快的定位速度以及更灵

敏的反应速度也是必要的。在移动过程中, 目标的速度并不是恒定或有严格规律的, 因此需要对目标位置信息实时更新, 才能够保证对目标速度变化的检测与应对。此外, 稳定性和可靠性也是必不可少的, 某些移动平台的工作环境较为严苛, 因此需要保证定位系统具有一定的稳定性与可靠性, 以实现在不同工作环境下的良好定位效果^[1-2]。

不仅如此, 定位技术还要求较高的适应性和灵活性, 在完成不同目标的工作时, 实现更多针对性

的扩展功能,以满足不同场合环境的需求。对于上述定位技术的不同特征,一个理想的定位技术需要结合精度、反应速度、稳定且可靠、高适应性和灵活工作环境等多个要求,实现各个参数指标的合理搭配,从而实现更强的移动平台定位能力^[3-4]。

目前,对于晶圆机器人搬运平台的定位方法常用的包括传统的激光定位、超声波定位、视觉定位以及较为新颖的超宽带定位方法^[4-7]。

超宽带(UWB)定位技术是一种在极宽频带上进行数据传输的新颖技术,其利用了超短脉冲或连续性脉冲抗干扰、高稳定性、低成本的特点,从而实现了高精度,更快反应速度的距离测量。最后,通过对目标多个点位的测距值使用三角测量或多变量定位方法,便可以计算出待测目标的具体位置信息,反馈给处理单元进行实时监控与计算^[8-10]。超宽带技术由于其传输功耗低,速率高的特点,目前被广泛应用于无线个人区域网络。对于超宽带信号的具体定义,最早由美国联邦通信委员会(FCC)于2002年4月提出。信号的峰值功率下降10dB时,其高端与低端频率的差值,与信号的中心频率或高频信号的载波频率的比值高于 $\frac{1}{5}$,此信号就被定义为超宽带信号。另一定义为信号的总带宽达到500Mhz以上的信号^[11-13]。

一般情况下,在频域上若某个信号具有较广的频率范围,那么通常也会具有较高的带宽,在时域范围内,一个信号的持续时间可以用其脉冲的宽度来表示,如果检测到一个信号拥有极短的脉冲宽度,那么就表明它的周期性变化速度极快,在很短时间内便可完成,这一特点也使得这个脉冲信号在时域上极易被观测到,拥有较高的分辨率,从而使得其传输的信息准确性高,抗干扰能力极强。同样,更

高的宽带使其在频域上有更大的覆盖范围,因此在频域上的分辨率也较高。同时,由于超宽带信号其脉冲极短的特点,使得利用超宽带定位技术的信息实现了更低功耗的有效传输。相比于其他方式,超宽带技术具有在不损耗性能的情况下更低成本、更多使用场景的优势,因此本研究使超宽带技术作为晶圆机器人搬运平台的定位技术并进行优化^[14-16]。

1 理论方法

目前常用的 UWB 测距方法有以下几种:TOF(Time of Flight)基于飞行时间的方法、TDOA(Time Difference of Arrival)基于到达时间差的方法、RSSI(Received Signal Strength Indication)基于信号强度的方法、AOA(Angle of Arrival)基于信号角度的方法以及混合方法。本文使用精度较高的 TOF 算法。

TOF 算法利用的是测量信号在发射端和接收端传输的往返时间进行距离计算的,发射端发射测量信号开始计时并在空中传播,到达接收端后停止计时,通过这之间传输的时间,再乘以信号传输的速度,便可以得到两个端点之间的距离。通过多个搭载了 UWB 模块的节点,实现了发射端到目标几个节点的距离测量,使用三边定位的算法,既可计算出目标节点所处的精确位置。基于 TOF 的定位算法具有定位精度高,测量灵敏的特点,相比于其他算法更适合在室内进行距离测量。然而,由于需要精确的计算发出信号和到达的时间节点,因此对每个节点的时钟同步要求较高,需要对每个模块的时间进行严格的同步^[17-20]。

传统的 SS-TWR(单边双向测距)算法,由于模块的 MCU 工作主频存在一定的偏差,因此在进行多

次计数获取时间信息时，会累计这一偏差，使得记录的时间偏差越来越大，导致了最终的累计误差值很高，从而使得时间存在较大误差，相应计算出的距离误差也较大。DS-TWR（双面双向测距）算法针对 SS-TWR 算法中的累计误差进行了改进，通过往返测距的方式，实现了对 MCU 主频累计误差的优化，极大的降低了由于时间误差累计导致的距离误差。算法原理如图 1 所示。

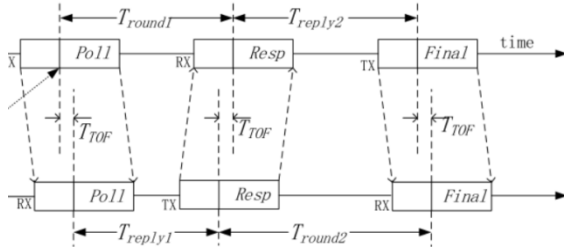


图 1 DS-TWR（双面双向测距）算法原理图

在原理图中，基站位置和标签位置各搭载了一个 UWB 模块，分别对应了信号的发射端与接收端，即测距的主节点与目标节点。发射端向接收端发出 UWB 信号的同时记录当前时间点 T_1 。接收端在接收到 UWB 信号后，会记录此时的时间点 T_2 ，同时向发射端发回一个响应信号并记录时间点 T_3 。经过一定飞行时间后，响应信号会被发射端接受，此时记录下当前时间点 T_4 。此时，发射端和接收端各自记录了两个时间点信息，第一段的测距完成。在第一段测距完成后，开始进行第二段的测距。发射端向接收端发出另一段 UWB 信号。该信号包含了第一段测距中的发射时间 T_1 、接收时间 T_4 已经新的发射时间 T_5 。与第一段测距相同，在接收端接收到这个新信号时后，会记录下当前的时间点 T_6 ，这样便可以计算出第二段测距的往返时间。最终，接收端会得到六个时间信息，第二段测距完成^[21-24]。使用这六个时间点数据，便可以根据 UWB 信号的飞行速度测算出对应的距离^[25-26]。

2 数值模型

根据算法原理图，如果使用传统的单边双向测距算法（SS-TWR），可以计算出两个飞行时间，方程式（1）和方程式（2）表示两个飞行时间的计算方法。

$$T_{TOF1} = \frac{T_{round1} - T_{reply1}}{2} \quad (1)$$

$$T_{TOF2} = \frac{T_{round2} - T_{reply2}}{2} \quad (2)$$

式中： T_{round1} 表示第一段测距时的发射端发出 UWB 信号的时间点 T_1 和接收到接收端响应信号的时间点 T_4 的时间差； T_{reply1} 表示第一段测距时接收端接收信号的时间点 T_2 和发出响应信号的时间点 T_3 的时间差； T_{round2} 表示接收端返回响应信号的时间点 T_3 与接收到第二段测距信号时间点 T_6 的时间差； T_{reply2} 表示发送端接收到响应信号时间点 T_4 与发送第二段测距信号的时间点 T_5 的时间差。由于信号传输的速度很快，使得两段测距间隔的时间非常短，因此可以认为两次测试的距离没有发生变化，两次飞行时间相同，即 $T_{TOF1} = T_{TOF2}$ 。由此可以计算出平均的飞行时间：

$$\overline{T_{TOF}} = \frac{T_{round1} + T_{round1} - T_{reply1} - T_{reply2}}{4} \quad (3)$$

然而，使用这种方法进行距离测量由于主频偏差的原因会存在一定的误差。每个时钟周期会使得计时器的计数器加 1，UWB 模块通过这个计数来获取时间节点。假设 UWB 模块微控制器 MCU 的设定主频为 10Mhz，那么如果计数器的值为 400 时，输出的时间值则为 40us。但是模块在实际运行时，MCU 的主频不是恒定的，会出现不可避免的偏差。如果主频的误差为 0.5%，那么同样是计数器的值为 400 时，真实的时间值应该是 39.8us（40*0.995），此时的时间误差为 0.2us，利用这个飞行时间计算距

离会产生一个距离误差 D_{error1} 为:

$$D_{error1} = \frac{C \times 0.2 \times 10^{-6}}{2} = 30m \quad (4)$$

式中: C 为 UWB 信号传输的速度, 一般取光速。而这一累计误差在计数变大会更加明显, 导致定位数据偏差过大。因此需要改变算法, 尽量减少由 MCU 主频偏差带来的距离误差。

由公式 (1) (2) 可将 T_{round1} , T_{round2} 转化为:

$$T_{round1} = 2T_{TOF1} + T_{reply1}, T_{round2} = 2T_{TOF2} + T_{reply2},$$

那么:

$$\begin{aligned} T_{round1}T_{round2} &= \\ (2T_{TOF1} + T_{reply1})(2T_{TOF2} + T_{reply2}) &= \\ 4T_{TOF1}T_{TOF2} + 2T_{TOF1}T_{reply2} + \\ 2T_{TOF2}T_{reply1} + T_{reply1}T_{reply2} \end{aligned} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} 4T_{TOF1} &= 2T_{TOF1} + 2T_{TOF2} = \\ (T_{round1} - T_{reply1}) + (T_{round2} - T_{reply2}) \end{aligned} \quad (6)$$

于是:

$$\begin{aligned} T_{round1}T_{round2} - T_{reply1}T_{reply2} &= \\ ((T_{round1} - T_{reply1}) + (T_{round2} - T_{reply2}))T_{TOF2} + \\ 2T_{TOF1}T_{reply2} + 2T_{TOF2}T_{reply1} &= \\ T_{TOF1}(T_{round1} + T_{reply1} + T_{round2} + T_{reply2}) \end{aligned} \quad (7)$$

最终得到:

$$T_{TOF} = \frac{T_{round1}T_{round2} - T_{reply1}T_{reply2}}{T_{round1} + T_{reply1} + T_{round2} + T_{reply2}} \quad (8)$$

最后再引入 UWB 模块的时钟误差, K_a 和 K_b 表示发射端及接收端模块的实际频率与标定频率的比率。同样以工作频率为 10Mhz 的 UWB 模块 MCU 为例, 其晶振时间误差通常为 $\pm 20\text{ppm}$, 即 0.00002。 K_a 和 K_b 分别取最大正偏差和最大负偏差, 即 $K_a = 0.99998$, $K_b = 1.00002$ 。假设发射端与接收端之间的距离为 1m 左右, 那么发射的 UWB 信号其飞行时间约为 $T_{TOF} = 3.34\text{ns}$ 。最终的距离误差 D_{error2} 为:

$$D_{error2} = T_{TOF} \left(1 - \frac{K_a - K_b}{2} \right) C = 0.02\text{mm} \quad (9)$$

通过这一改进, DS-TWR (双面双向测距) 算法可以基本忽略由 MCU 主频偏差带来的距离误差, 从而实现基于传统 SS-TWR (单边双向测距) 算法的定位优化。

3 仿真实验

在实验中, 将三个搭载 UWB 传感器模块被布置在晶圆移动平台的三个位置上。三个基站的位置信息如图 2 所示。

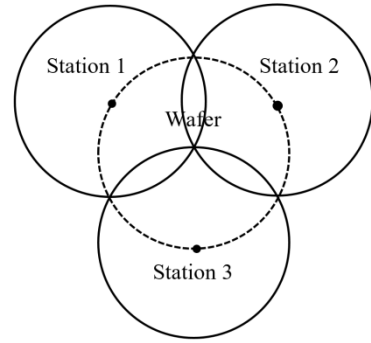


图 2 三基站位置信息

固定在移动平台上的三个基站即为测距的目标节点, 而在一旁的定点位置再设定一个基站 0, 作为测距的主节点, 通过基站 0 作为发射端发送 UWB 信号, 由三个平台上的基站作为接收端接收并返回响应信号, 实现对三个位置的测距, 最终基站 0 将所得到的位置信息通过串口发送给上位机器, 再通过三边定位等算法实现对移动平台中心位置的计算, 达到对平台定位的目的^[27]。

三边定位的求解过程如下, 三个基站坐标分别记为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 和 (x_3, y_3) , 而需要求解的平台中心位置坐标为 (x_0, y_0) 。通过飞行时间 T_{TOF} 计算出从基站 0 到其他三个基站的距离分别为 d_1 、 d_2 、 d_3 。 d_1 、 d_2 、 d_3 可以由基站坐标表示为:

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \\ d_2 = \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2} \\ d_3 = \sqrt{(x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2} \end{cases} \quad (10)$$

将方程的左右两边平方并展开，可以得到：

$$\begin{cases} d_1^2 = x_1^2 + x_0^2 + y_1^2 + y_0^2 - 2x_1x_0 - 2y_1y_0 \\ d_2^2 = x_2^2 + x_0^2 + y_2^2 + y_0^2 - 2x_2x_0 - 2y_2y_0 \\ d_3^2 = x_3^2 + x_0^2 + y_3^2 + y_0^2 - 2x_3x_0 - 2y_3y_0 \end{cases} \quad (11)$$

将这个方程组用矩阵可以表示为：

$$\begin{pmatrix} -2x_1 & -2y_1 & 1 \\ -2x_2 & -2y_2 & 1 \\ -2x_3 & -2y_3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ R^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1^2 \\ r_2^2 \\ r_3^2 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\text{其中： } R^2 = x_0^2 + y_0^2, \begin{cases} r_1^2 = d_1^2 - x_1^2 - y_1^2 \\ r_2^2 = d_2^2 - x_2^2 - y_2^2 \\ r_3^2 = d_3^2 - x_3^2 - y_3^2 \end{cases}$$

$$\text{定义一个 } Q = \begin{pmatrix} -2x_1 & -2y_1 & 1 \\ -2x_2 & -2y_2 & 1 \\ -2x_3 & -2y_3 & 1 \end{pmatrix}, \theta =$$

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ R^2 \end{pmatrix}, b = \begin{pmatrix} r_1^2 \\ r_2^2 \\ r_3^2 \end{pmatrix}$$

可以将矩阵最终表示为：

$$Q\theta = b \quad (13)$$

最后使用最小二乘法，即可得到 θ 的值：

$$\theta = (Q^T Q)^{-1} Q^T b \quad (14)$$

即可得到平台中心位置坐标 (x_0, y_0) ^[28-29]。

移动平台的实际轨迹如图 3 所示，为长 3m、宽 2m 的 U 形轨迹。晶片被放置在移动平台上，并在传送带上以固定速度移动。测距由固定点的 UWB 传感器和移动平台上的三个 UWB 基站完成。

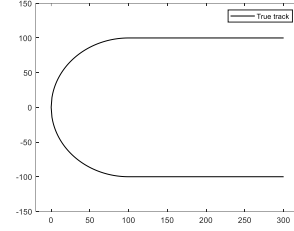


图 3 晶圆移动平台的实际轨迹

4 数据分析

在未优化的 SS-TWR 算法中，采样的数据点越多，记录的时间节点就越多，从而主频偏差引起的累计误差越大。因此，随着采样点数量的增加，测试轨迹和真实轨迹之间的差距也会增加。图 4 显示了使用 SS-TWR 算法的 UWB 定位的测试轨迹。分别对五个点(300, 100)、(100, 100)、(0, 0)、(100, -100)和(300, -100)的距离测量值进行了三次采样。基于 SS-TWR 算法的超宽带定位技术的测试结果如表 1 所示。

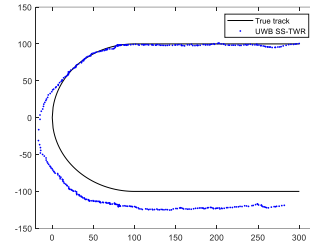


图 4 基于 SS-TWR 算法的超宽带定位技术的测试轨迹

表 1 基于 SS-TWR 算法的超宽带定位技术的测试结果

采样点	第一次测距值	第二次测距值	第三次测距值	平均测距值	平均误差
(300, 100)	(300.18, 100.25)	(300.80, 99.75)	(299.48, 99.97)	(300.15, 99.99)	(0.50, 0.17)
(100, 100)	(92.26, 103.09)	(123.72, 106.62)	(96.02, 92.02)	(104.00, 100.57)	(11.81, 5.90)
(0, 0)	(-17.98, -6.62)	(37.12, 10.84)	(10.84, 2.92)	(9.99, 2.38)	(21.98, 6.79)
(100, -100)	(77.62, -113.77)	(126.01, -88.63)	(90.25, -111.97)	(97.96, -104.79)	(19.38, 12.37)
(300, -100)	(290.76, -114.02)	(337.73, -87.88)	(294.07, -117.98)	(307.52, -106.63)	(17.63, 14.71)

SS-TWR 算法优化的 DS-TWR 算法有效地避免了 UWB 模块 MCU 主频偏差引起的累积误差。当基站记

录的时间差较大时，距离测量值与真实值之间的误差不会累积太多，时钟偏差的影响基本可以忽略不

计。图 5 显示了使用 DS-TWR 算法的 UWB 定位的测试轨迹。基于 DS-TWR 算法的 UWB 定位技术的测试结果如表 2 所示。

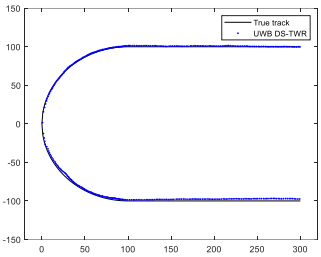


图 5 基于 DS-TWR 算法的超宽带定位技术的测试轨迹

表 2 基于 DS-TWR 算法的超宽带定位技术的测试结果

采样点	第一次测距值	第二次测距值	第三次测距值	平均测距值	平均误差
(300,100)	(299.93,99.99)	(300.16,99.95)	(300.65,100.06)	(300.24,100.00)	(0.29,0.04)
(100,100)	(98.92,98.64)	(104.03,100.83)	(101.16,100.90)	(101.37,100.12)	(2.09,1.03)
(0, 0)	(-2.78,-1.19)	(1.72,-0.75)	(1.30,1.53)	(0.08,-0.14)	(1.93,1.16)
(100,-100)	(97.71,-99.82)	(98.93,-102.79)	(101.60,-97.63)	(99.42,-100.08)	(1.65,1.78)
(300,-100)	(296.77,-99.82)	(298.84,-103.10)	(301.01,-98.54)	(298.88,-100.49)	(1.80,1.58)

使用激光传感器进行测量的传统激光定位技术其定位精度很高，可以达到毫米级，但是由于其物理特性，容易受到场景中其他光线的干扰，导致误差变大，同时价格更高，装配存在一定的限制。图 6 显示了使用激光定位的测试轨迹。激光定位技术的测试结果见表 3 所示^[30]。

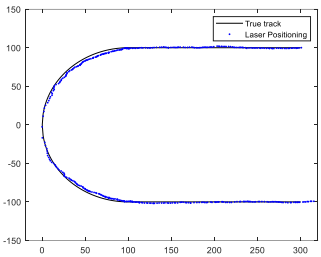


图 6 传统激光定位技术的测试轨迹

表 3 传统激光定位技术的测试结果

采样点	第一次测距值	第二次测距值	第三次测距值	平均测距值	平均误差
(300,100)	(300.37,100.09)	(299.65,100.35)	(299.44,99.86)	(299.82,100.10)	(0.43,0.19)
(100,100)	(95.31,100.76)	(101.44,104.00)	(93.01,96.41)	(96.59,100.39)	(4.37,2.78)
(0, 0)	(4.67,3.02)	(-0.17,4.34)	(6.37,-2.65)	(-0.63,1.57)	(3.74,3.33)
(100,-100)	(101.01,-101.57)	(105.90,-89.94)	(91.52,-102.87)	(99.48,-98.13)	(5.13,4.84)
(300,-100)	(286.68,-103.00)	(312.46,-92.72)	(291.14,-105.60)	(296.76,-100.44)	(11.55,5.29)

通过与 SS-TWR 算法的 UWB 定位技术和激光定位技术进行比较, 基于 DS-TWR 算法的优化 UWB 定位技术具有系统定位误差保持在小范围内、稳定、定位精度高的特点。同时, 系统在真实环境中可能面临各种干扰和挑战, 如多径传播、信号衰减和障碍物阻碍, 对比三种定位方式的测试结果数据不难发现, 基于 DS-TWR 算法的 UWB 定位技术也拥有较好的鲁棒性, 即使在外界环境的干扰下, 也能够维持其功能稳定运行, 同时保证其定位精度达到要求。

5 结 论

本文研究了基于 UWB 技术的三边定位技术, 采用基于飞行时间 T_{TOF} 的方法, 应用在了工作环境较小, 精度要求高的晶圆搬运机器人中。同时针对 SS-TWR 算法在 UWB 模块 MCU 主频偏差引起的误差的问题, 改进了 DS-TWR 算法, 并且通过仿真实验完成了 DS-TWB 算法的定位测试, 与传统的激光定位进行了比较。

结果表明, 基于 DS-TWR 算法的 UWB 定位技术不仅解决了 SS-TWR 算法累积误差的问题, 同时相较于激光定位技术, 能够实现用更低的成本得到相近的定位精度, 并且在外界干扰下也可以实现稳定的工作, 具有很强的适应性, 在未来的定位技术发展拥有较为广泛的应用前景。

注: 本文通讯作者为刘傲林。

参考文献

- [1] MARRUGO D A, VILLA J L. MPC-based path tracking of a differential-drive mobile robot with optimization for improved control performance [C]// Workshop on Engineering Applications. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023: 276-289.
- [2] CASAS R, MARCO Á, GUERRERO J J, et al. Robust estimator for non-line-of-sight error mitigation in indoor localization [J]. EURASIP journal on advances in signal processing, 2006(2): 1-8.
- [3] WAN Q, WU T, ZHANG K, et al. A high precision indoor positioning system of BLE AOA based on ISSS algorithm [J]. Measurement, 2024, 224: 113801.
- [4] AUBECK F, ISERT C, GUSENBAUER D. Camera based step detection on mobile phones [C]// 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Guimaraes, Portugal: IEEE, 2011: 21-23.
- [5] JYH-HWA T, KUO L S. The development of the restaurant service mobile robot with a laser positioning system [C]// 2008 27th Chinese control conference. Kunming: IEEE, 2008: 662-666.
- [6] IJAZ F, YANG H K, AHMAD A W, et al. Indoor positioning: a review of indoor ultrasonic positioning systems [C]// 2013 15th International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT). Pyeong Chang, South Korea: IEEE, 2013: 1146-1150.
- [7] ZHANG H, JIN L, YE C. An RGB-D camera based visual positioning system for assistive navigation by a robotic navigation aid [J]. IEEE/CAA journal of automatica sinica, 2021, 8(8): 1389-1400.
- [8] BU W X, ZHU Y P, HE Z L. UWB location algorithm and experimental research based on interacting multiple model [J]. Foreign electronic measurement technology, 2021, 40(4): 22-26.
- [9] BOTLER L, SPÖRK M, DIWOLD K, et al. Direction finding with UWB and BLE: a comparative study [C]// 2020 IEEE 17th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS). [S.l.]: IEEE, 2020: 44-52.
- [10] AMBUJ P, LUTZ L, ROBERT S, et al. Analysis of Equalization for DS-UWB systems [C]// IEEE International Conference on Ultra-Wideband. Zurich, Switzerland: IEEE, 2005: 170-175.
- [11] FOWLER C, ENTZMINGER J, CORUM J. Assessment of Ultra-wideband (UWB) technology [J]. IEEE aerospace and electronic systems magazine, 1990, 5(11): 45-49.
- [12] FCC. FCC report and order for part 15 acceptance of ultra wideband (UWB) system from 3.1-10.6 GHz[EB/OL]. <https://www.fcc.gov/>.
- [13] BENEDETTO M G D, KAISER T, MOLISCH A F, et al. UWB communication systems: a comprehensive overview [EB/OL]. [2023-02-11]. <https://zbmath.org/?q=an%3A05828872>.
- [14] FAUSER T, BRUDER S, EL-OSERY A. A comparison of inertial-based navigation algorithms for a low-cost indoor

- mobile robot [C]// 2017 12th International Conference on Computer Science and Education (ICCSE). [S.l.]: IEEE, 2017: 101-106.
- [15] LAN F J, LIU R, GUO L, et al. Mobile robot localization based on ultra-wideband bearing and ranging [J]. Journal of electronic measurement and instrumentation, 2023, 37(8): 155-163.
- [16] BELLUSCI G. Ultra-wideband ranging for low-complexity indoor positioning applications [EB/OL]. [2024-02-04]. https://www.xsens.com/images/stories/PDF/Thesis_PhD_Giovanni_Bellusci.pdf.
- [17] YANG J Y, YAN M. Implementation of UWB indoor location and distance measurement based on TOF algorithm [J]. MATEC web of conferences, 2018, 173: 03018.
- [18] KARKRAOUI M, ATTARIUAS H. GNSS positioning improvement based on satellite selection [C]// 2022 5th International Conference on Artificial Intelligence and Big Data. Chengdu: IEEE, 2022: 101.
- [19] ZHOU B, JING C, KIM Y. Joint TOA/AOA positioning scheme with IP-OFDM systems [J]. Wireless personal communications, 2014, 75(1): 261-271.
- [20] YOUNG D P, KELLER C M, BLISS D W. Ultra-wideband (UWB) transmitter location using time difference of arrival (TDOA) techniques [C]// 37th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. [S.l.]: IEEE, 2003: 1225-1229.
- [21] XU Z, DAI E, GE J. Fast ranging method in cooperative positioning [J]. The journal of engineering, 2019, 2019(4): 9049-9052.
- [22] MA W, FANG X, LIANG L, et al. Research on indoor positioning system algorithm based on UWB technology [J]. Measurement: sensors, 2024, 33: 101121.
- [23] CHENG Y, ZHOU T. UWB indoor positioning algorithm based on TDOA technology [C]// 2019 10th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME). [S.l.]: IEEE, 2019: 777-782.
- [24] DENG P, LIU L, DENG Z P. An NLOS error mitigation scheme based on TDOA reconstruction for cellular location services [J]. Chinese journal of radio science, 2003, 18(3): 311-316.
- [25] TAKAHARA H, OHNO K, ITAMI M. A study on UWB radar assisted by inter-vehicle communication for safety application [C]// 2012 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. [S.l.]: IEEE, 2012: 99-104.
- [26] GEZICI S. A survey on wireless position estimation [J]. Springer wireless personal communications, 2008, 44(3): 263-282.
- [27] YU K, WEN K, LI Y, et al. A novel NLOS mitigation algorithm for UWB localization in harsh indoor environments [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2018, 68(1): 686-699.
- [28] TRIBIKRAM K, SAMIK D, KUMAR V. Point of impact prediction in isotropic and anisotropic plates from the acoustic emission data [J]. Journal of the acoustical society of America, 2007, 122(4): 2057.
- [29] MARILYNN P. Sample MAC requirements for angle of arrival based ranging [EB/OL]. [2024-01-11]. <http://www.802wirelessworld.com/groupselect.frm>.
- [30] WANG Z R, YAN B X, DONG M L, et al. A localization method of wall-climbing robot based on lidar and improved AMCL [J]. Chinese journal of scientific instrument, 2022, 43(12): 220-227.

作者简介: 刘傲林(1998—), 男, 四川金堂人, 硕士研究生, 研究方向为机器人与自动化装备。

荆学东(1968—), 男, 陕西咸阳人, 工学博士, 教授, 研究方向为机器人技术及智能检测技术。