

# 基于TOA与AOA算法的室内定位方法

郭立新, 王云鹏

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 为了解决传统室内定位技术成本较高、稳定性差以及难于部署等问题, 提出一种将到达时间(time of arrival, TOA)与到达角(angle of arrival, AOA)相结合的室内定位系统. 该系统由定位基站与被控定位单元组成, 其特征在于使用对射式布置的超声波传感器获取定位基站与被控定位单元之间的距离特征, 利用角度传感器获取被控定位单元相对于定位基站的角度特征, 以单基站就实现了精确的室内定位过程. 分析了该系统基本结构与原理, 建立定位与控制模型, 在一定范围内对其定点定位精度与跟随定位精度进行了实验验证. 实验结果表明: 该系统结构简单, 易于安装布置, 鲁棒性强, 在测试范围内的最大定点定位误差不超过5 cm, 跟随定位误差不超过15 cm.

**关键词:** 室内定位; 超声波; AOA算法; TOA算法; 传感器

中图分类号: TN 98 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)08-1115-08

## Indoor Positioning Method Based on TOA and AOA Algorithms

GUO Li-xin, WANG Yun-peng

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WANG Yun-peng, E-mail: gebaimian@qq.com)

**Abstract:** To solve the problems of high cost, poor stability, and difficulty in deployment, a new indoor positioning system combining time of arrival (TOA) and angle of arrival (AOA) is proposed. The system is composed of the positioning base station and the controlled positioning unit. It is characterized by using the ultrasonic sensor arranged in the firing type to obtain the distance characteristics between the positioning base station and the controlled positioning unit, and using the angle sensor to obtain the angle characteristics of the controlled positioning unit relative to the positioning base station. A single base station is used to realize the accurate indoor positioning process. The basic structure and principle of the system are analyzed, the positioning model is established, and the fixed point positioning accuracy and tracking positioning accuracy are experimentally verified in a certain range. The experimental results show that the system has a simple structure, easy installation and strong robustness. The maximum fixed-point positioning error within the test range is less than 5 cm, and the tracking positioning error is less than 15 cm.

**Key words:** indoor positioning; ultrasonic wave; AOA (angle of arrival) algorithm; TOA (time of arrival) algorithm; sensor

随着传感器技术、芯片集成化技术以及半导体技术的发展, 无线定位技术已经成为近十年来最具吸引力的研究趋势之一, 其定位精度与稳定性都有了较大提升<sup>[1]</sup>. 在种类繁多的无线定位技术领域, 定位技术按其用途可具体划分为两类,

较为熟知的一类是全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)<sup>[2]</sup>, 主要应用于卫星信号强烈的室外环境中进行大面积精确定位. 但是通常情况下卫星信号比较微弱, 不能穿透屋顶、隧道和其他障碍, 导致这种定位技术不

能在室内环境中使用<sup>[3]</sup>. 针对这一情况, 只能利用各种可以收集的环境信息或信号来实现定位, 主流的室内定位系统根据其信号种类可以分为射频信号、环境信号、运动信号以及视觉信号四大类<sup>[4]</sup>. 其中环境信号中最为常见的是超声波信号, 与其他信号相比具有成本低、功耗低以及计算复杂度低等优势. 但目前基于超声波传感器的室内定位系统都存在部署方式较为复杂, 需要在特定的区域或者点位才能实现定位且存在鲁棒性较差等问题, 故如何设计出一种准确性高、稳定性强且易于部署与安装的超声波定位系统成为了很多业内人士的关注重点<sup>[5-6]</sup>.

对于利用超声波作为室内定位系统核心的相关研究有很多, 针对定位基站或锚点的布置方式, 埃尔朗根-纽伦堡大学微波与光子研究所于 2016 年提出了一种基于超声波信号的到达时间 (TOA) 和到达角 (AOA) 估计实现精确位置估计的室内定位系统, 该方法主要原理是通过部署在不同感兴趣区域内的传感器锚点检测来自超声波发生装置的传入信号, 该算法采用距离与方位相结合的定位方法, 其特点是能够处理模糊的 AOA 传感器数据<sup>[7]</sup>. 其中 Zhang 等<sup>[8]</sup>介绍了一种用于 AGV (automated guided vehicle) 系统室内定位的多自由度超声波接收装置, 该装置可以实时跟踪 AGV 上的超声波发射装置, 从而减少了波损耗现象和定位盲区造成的定位误差. 意大利佩鲁贾大学团队通过到达时间差 (time difference of arrival, TDOA) 的测量提出了一种最佳线性无偏估计器 (best linear unbiased estimator, BLUE) 算法, 并且与最小二乘估计器 (least-square estimation, LSE) 进行了比较, 通过比较多径信道影响视距 (line of sight, LoS) 获得定位信息, 并通过数值模拟进行了验证, 结果表明该方法的精度和处理时间与 LSE 方法相比更为简单且有效<sup>[9]</sup>.

在定位算法方面, Chew 等<sup>[10]</sup>提出了一种基于弹簧松弛技术的超声波室内定位方式, 旨在通过各个超声波装置的距离差计算出净力, 进而校准迭代出较为精准的定位信息. Gabrielli 等<sup>[11]</sup>设计出了一种超声波室内定位的回波抑制延迟估计器 (echo suppression delay estimator, ESDE), 该控制器在接收信号门控步骤中应用回波抑制策略, 门的输出信号通过优化的交叉相关器进行关联, 并将输出转发到峰值检测器以检索时延估计, 计算出定位信息. Fischer 等<sup>[12]</sup>提出了一种多模态室内定位方法, 使用蓝牙数据对 TDOA 双曲

线进行约束, 提高了超声波传感器的精度, 且这一方法扩展了传统超声波传感器的探测范围. 蒋林等<sup>[13]</sup>提出一种冗余超声波信息特殊融合法, 此算法的基本原理是利用冗余信息间的几何关系以及冗余信息与误差间的隐含关系, 进行误差评估与误差修正, 从而维持定位精度在一个较高的水平. 为了提高超声波定位系统的泛用性, 李昌禄等<sup>[14]</sup>提出了一种采用局域网络传输技术优化定位数据, 同时利用射频通讯技术保持超声波发送装置和接收装置的时序同步, 由此提高了定位系统中的测距精度, 值得一提的是该算法利用病态数学与良态数学的理论指导参考点的布置, 以减小定位误差. 王凡等<sup>[15]</sup>采用总体最小二乘法的直线拟合方法对距离测量误差进行补偿, 修正距离值, 然后采用极小极大算法进行定位的位置坐标计算, 得到系统测距误差较小的定位结果.

在超声波室内定位系统的实际应用中, 难以避免会出现定位基站或者锚点部署困难、安装成本较高以及定位系统稳定性较差等问题<sup>[16]</sup>. 在保证定位精度的前提下, 如何解决上述难题成为了超声波室内定位系统产业化的主要问题之一<sup>[17]</sup>. 本文针对部署困难与安装成本问题, 提出了基于特征距离与特征角的定位信息计算方法. 为了验证该定位系统的精度, 本文分别对该系统进行了定点定位实验与跟随定位实验. 同时, 针对定点定位实验中的数据误差波动问题, 本文对比使用了均值处理算法、PSO 粒子群算法以及马尔可夫链算法. 对于跟随定位实验过程, 本文使用了基于导航线的航迹修正方法、插点法以及卡尔曼滤波算法进行对比验证.

## 1 超声波定位系统结构与工作流程

本文所涉及的室内定位系统的基本结构包含 2 个相同的定位单元 A 与 B, 分别置于基站与移动平台上方, 其中定位单元 A 包含超声波接收器  $R_{aa}$  与  $R_{ab}$ , 超声波发射器  $T_a$ . 定位单元 B 包含超声波接收器  $R_{ba}$  与  $R_{bb}$ , 超声波发射器  $T_b$ , 其中超声波接收器位于定位单元左右两侧, 超声波发射器位于定位单元中央, 伺服电机位于定位单元下方, 本文所涉及的室内定位系统基本结构见图 1.

其中定位单元 A 的中心位置  $O_G$  为全局参考系的原点, 其主要功能在于接收并处理传感器搜集到的距离特征  $I_a$  与角度特征  $\alpha_1$ , 并将其转化为局部参考系原点位置  $O_p$ , 随后利用优化算法对原

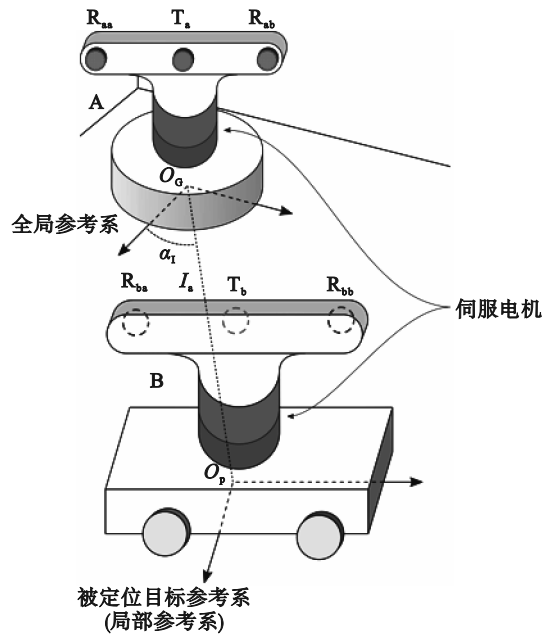


图 1 室内定位系统基本结构

Fig. 1 Basic structure of indoor positioning system

始定位数据的误差进行修正,最后通过无线通信设备传输给定位单元 B. 该室内定位系统主要涉及 3 个基本过程,即伺服电机的角度校准、定位数据获取以及移动平台的控制,具体过程见图 2.

## 2 超声波定位系统角度校准

### 2.1 伺服电机的角度校准原理

伺服电机的角度校准主要目的是为了保证该室内定位系统运行时 2 个定位单元的超声波收发装置一直朝向对方. 其原因为:在定位过程中,保证其中一个定位单元的超声波发射装置发射的超声波信号可以准确地被另一个定位单元的接收装置捕捉到;保证角度传感器获得的特征角度能够准确表示 2 个定位单元连线与坐标轴之间的夹角,以便用于定位信息的计算. 上述过程主要基于一个被称为二次校准的过程,如图 3 所示.

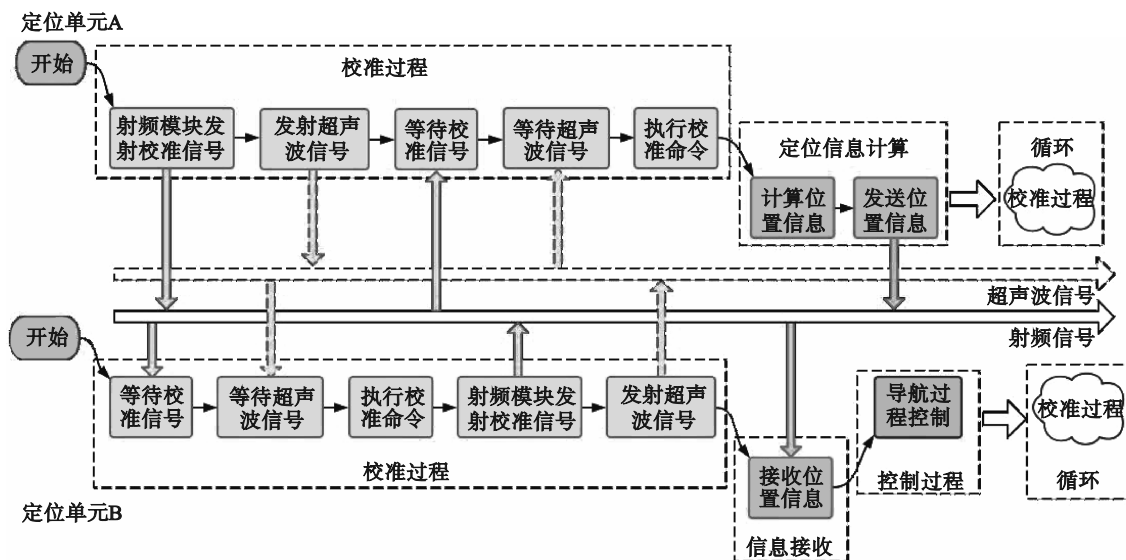


图 2 室内定位系统的主要控制流程

Fig. 2 Main control process of indoor positioning system

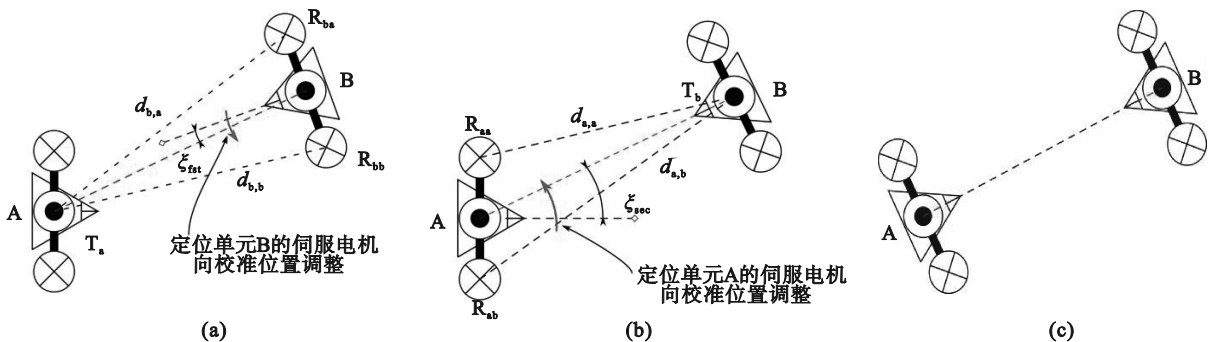


图 3 二次校准过程

Fig. 3 Secondary calibration process

(a) — 第一次校准,调整定位单元 B 角度; (b) — 第二次校准,调整定位单元 A 角度; (c) — 校准完成后的示意图.

图中： $d_{b,a}$  和  $d_{b,b}$  分别表示超声波发射器  $T_a$  与超声波接收装置  $R_{ba}$  和  $R_{bb}$  站之间的距离； $d_{a,a}$  和  $d_{a,b}$  分别表示超声波发射器  $T_b$  与超声波接收装置  $R_{aa}$  和  $R_{ab}$  站之间的距离； $\zeta_{fst}$  和  $\zeta_{sec}$  分别表示 2 次校准过程中超声波装置中线当前位置与校准位置之间的夹角。

### 2.2 伺服电机的角度校准模型

首先假设初始时刻 2 个定位单元的超声波模块朝向随机,其中由定位单元 A 发射超声波,同时定位单元 B 开启定时器,超声波分别到达定位单元 B 的 2 个超声波接收传感器  $R_{ba}$  与  $R_{bb}$ ,定时器分别记录 2 个超声波接收传感器接收到超声波的时间响应,分别为  $t_{ab,a}$  与  $t_{ab,b}$ ,被称为超声波的飞行时间,由此可分别计算出定位单元 A 到定位单元 B 所属超声波接收器的距离  $d_{b,a}$  与  $d_{b,b}$ ,此过程为第一次校准过程.同理,第二次校准过程由定位单元 B 发射超声波,同时定位单元 A 开启定时器,超声波分别到达定位单元 A 的 2 个超声波接收传感器  $R_{aa}$  与  $R_{ab}$ ,定时器分别记录 2 个超声波接收传感器接收到超声波的时间响应分别为  $t_{ba,a}$  与  $t_{ba,b}$ ,可由式(1)分别计算出定位单元 B 到定

位单元 A 所属超声波接收器的距离  $d_{a,a}$  与  $d_{a,b}$ .

$$D = \begin{bmatrix} d_{b,a} \\ d_{b,b} \\ d_{a,a} \\ d_{a,b} \end{bmatrix}^T = v_{\text{sound}} \begin{bmatrix} t_{ab,a} \\ t_{ab,b} \\ t_{ba,a} \\ t_{ba,b} \end{bmatrix}^T \times 10^{-2}. \quad (1)$$

式中： $v_{\text{sound}}$  代表声速, m/s, 在一般情况下, 声速受温度  $t$  的影响较为明显, 温度数据由定位基站上的温度传感器提供, 故此处温度对空气中声速的影响可由式(2)计算出来.

$$v_{\text{sound}}(t) = 331 + 0.6t. \quad (2)$$

显然,  $d_{b,a}$  与  $d_{b,b}$  的起点在同一位置, 经过式(1)得到的  $d_{b,a}$  与  $d_{b,b}$  的长度的差可以反映出超声波装置当前位置距离校准位置的偏转程度, 通过计算此偏转程度可以得知此时定位单元 B 的伺服电机该向何处做多大幅度的调整. 为了更加清晰地判断超声波装置当前位置距离校准位置的偏转程度, 可以引入偏转角矩阵  $\zeta_T$ , 即超声波装置中线当前位置与校准位置之间的夹角. 不妨假设同一定位单元中 2 个超声波接收装置的距离均为  $r_r$ , 接下来可将图 3 中两次校准过程进行简化, 见图 4.

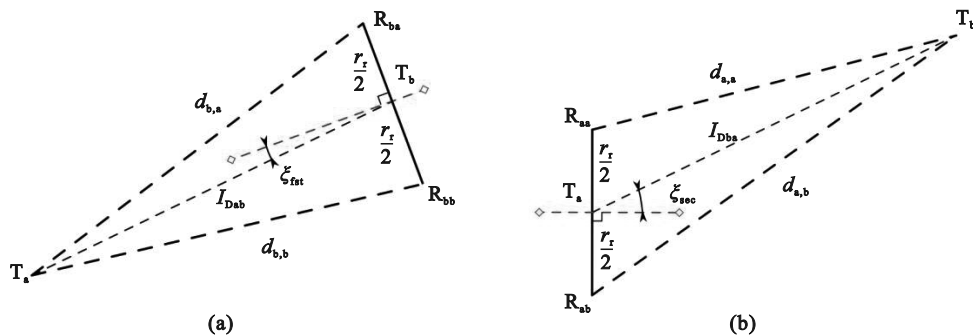


图 4 校准过程简化模型

Fig. 4 Simplified model of the calibration process

(a)—第一次校准简化模型; (b)—第二次校准简化模型.

为了更加直观表现偏转方向, 需要偏转角  $\zeta_{fst}$  与  $\zeta_{sec}$  是一个带正负号的变量, 其正负号代表伺服电机需要调整的方向, 其大小代表伺服电机需要在该方向上调整的幅度, 根据现在已得到的信息可以得到该偏转角的计算模型, 如式(3)所示.

$$\zeta_T = \begin{bmatrix} \zeta_{fst}(I_{Dab}, r_r, d_{b,a}, d_{b,b}) \\ \zeta_{sec}(I_{Dba}, r_r, d_{a,a}, d_{a,b}) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

式中： $I_{Dab}$  与  $I_{Dba}$  为两次校准过程中定位单元超声波发射器即  $T_a$  与  $T_b$  之间的距离； $\zeta_T$  可由式(4)与式(5)求出.

$$I_a = \begin{bmatrix} I_{Dab} \\ I_{Dba} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{d_{b,a}^2 + \frac{r_r^2}{4} - r_r d_{b,a} \cos\left(\arccos \frac{d_{b,a}^2 + r_r^2 - d_{b,b}^2}{2r_r d_{b,a}}\right)} \\ \sqrt{d_{a,a}^2 + \frac{r_r^2}{4} - r_r d_{a,a} \cos\left(\arccos \frac{d_{a,a}^2 + r_r^2 - d_{a,b}^2}{2r_r d_{a,a}}\right)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{d_{b,a}^2}{2} - \frac{r_r^2}{4} + \frac{d_{b,b}^2}{2}} \\ \sqrt{\frac{d_{a,a}^2}{2} - \frac{r_r^2}{4} + \frac{d_{a,b}^2}{2}} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \sqrt{2d_{b,a}^2 - r_r^2 + 2d_{b,b}^2} \\ \sqrt{2d_{a,a}^2 - r_r^2 + 2d_{a,b}^2} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\xi_T = \begin{bmatrix} \xi_{fst} \\ \xi_{sec} \end{bmatrix} = \frac{\pi}{2} - \begin{bmatrix} \arccos \frac{I_{Dab}^2 + \frac{r_r^2}{4} - d_{b,b}^2}{I_{Dab} r_r} \\ \arccos \frac{I_{Dba}^2 + \frac{r_r^2}{4} - d_{a,a}^2}{I_{Dba} r_r} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

$\xi_T$  的大小反映了超声波装置中线当前位置与校准位置之间偏离的剧烈程度,同时也为校准时伺服电机的调整力度提供了一个数值参考,故此处可以根据  $\xi_T$  的绝对值大小控制伺服电机的调整力度.至此定位系统的伺服电机完成了两次校准,当该定位阶段的校准过程完成时,该定位系统将利用校准后获取的特征角度与特征距离计算定位信息并对移动平台进行动作控制.

### 3 定位数据的计算与移动平台控制

#### 3.1 建立定位模型

校准过程完成后,超声波装置已处于校准位置,即可以认为 2 个定位单元的超声波传感器相互面对,此时角度传感器获得的特征角度可以近似表示 2 个定位单元连线与坐标轴之间的准确夹角.随后可以使用已获得信息在以定位基站为原点的极坐标系下进行定位信息的计算,定位数据依赖于伺服电机角度特征与 2 个定位单元之间的距离特征.为了方便建立定位与控制模型,全局坐标系  $O_G$  中设定定位单元 A 的 X 轴方向为角度的起始位置,即点  $O$ ,而在局部坐标系  $O_p$  中移动平台的当前方向为角度的起始位置,设定控制模型的目标点  $P_{target}(x_{target}, y_{target})$ ,可建立如图 5 所示的定位系统状态模型.

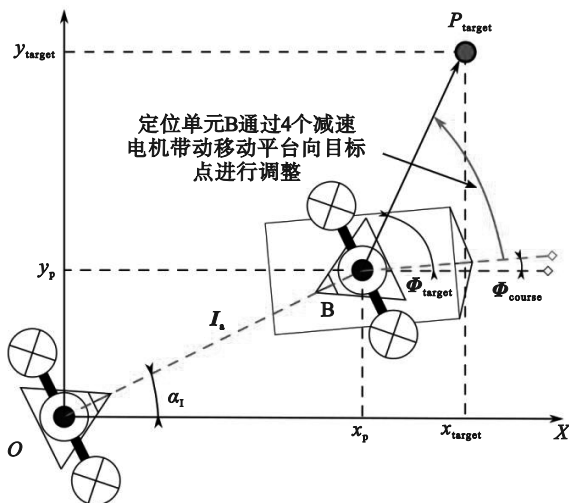


图 5 定位系统状态模型

Fig. 5 Positioning system state model

根据三角函数与各个点之间的几何关系,可以利用式(6)推导出移动平台也就是定位单元 B 的所在位置.

$$P_a = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} I_{Dab} \cos(\alpha_1^I) \\ I_{Dba} \sin(\alpha_1^{II}) \end{bmatrix}^T. \quad (6)$$

式中:  $\alpha_1^I$  与  $\alpha_1^{II}$  分别为两个校准过程中伺服电机相对于初始角位置的角位移.得到移动平台的具体位置以后,通过此定位信息与目标点位置控制移动平台运动.

#### 3.2 建立移动平台控制模型

移动平台的控制模型基于点到点的几何关系,首先计算当前点即定位单元 B 位置到目标点  $P_p$  的矢量线段与定位坐标系的 X 轴夹角  $\Phi_{target}$ .随后计算移动平台当前方向与定位坐标系的 X 轴夹角,即航向角  $\Phi_{course}$ .若移动平台当前姿态角处于目标夹角的容许范围内,则控制移动平台向目标点  $P_p$  前进,否则控制 4 个减速电机向容许范围内调整.根据这个原理,若假设定位单元 B 中超声波装置的校准位置与角度起始位置的夹角为  $\Phi_{current}$ ,可以简化不同目标点位置的控制模型基本结构,见图 6.

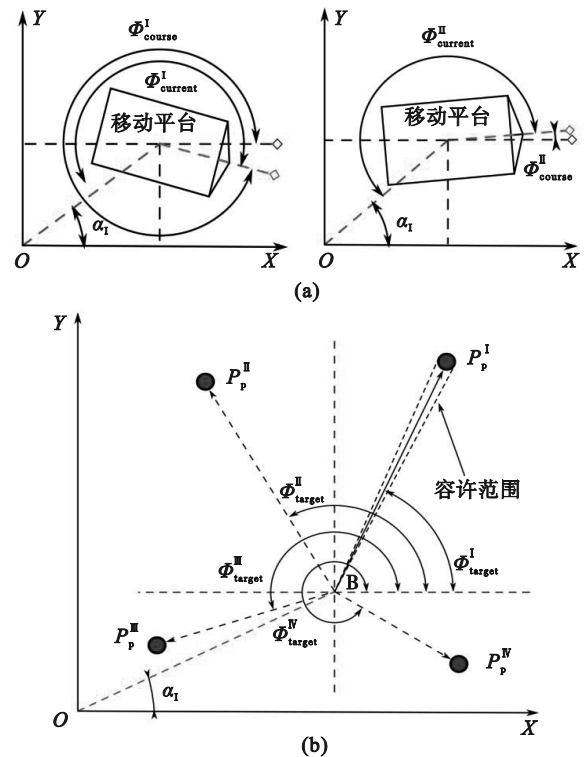


图 6 移动平台控制模型

Fig. 6 Mobile platform control model

(a) 一两种不同情况下的航向角; (b) 一目标点的 4 种可能.

根据本文所涉及控制模型的基本原理,为了实现移动平台控制系统的正常运行,除了要获取

移动平台的坐标外,还需要获得目标角度  $\Phi_{\text{target}}$  以及移动平台当前姿态角  $\Phi_{\text{current}}$ . 对于目标角度  $\Phi_{\text{target}}$ , 将定位单元坐标  $B(x_B, y_B)$  作为基点, 按照坐标轴方向将区域分割为 4 个部分. 分别在各个区域假设 1 个目标点, 位置分别为  $P_p^I(x_T^I, y_T^I)$ ,  $P_p^{II}(x_T^{II}, y_T^{II})$ ,  $P_p^{III}(x_T^{III}, y_T^{III})$  与  $P_p^{IV}(x_T^{IV}, y_T^{IV})$ , 由此建立目标角度求解模型如式(7)所示.

$$\Phi_{\text{target}} = \begin{bmatrix} \Phi_{\text{target}}^I \\ \Phi_{\text{target}}^{II} \\ \Phi_{\text{target}}^{III} \\ \Phi_{\text{target}}^{IV} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \arctan \frac{y_T^I - y_B}{x_T^I - x_B} \\ \pi - \arctan \frac{y_T^{II} - y_B}{x_B - x_T^{II}} \\ \pi + \arctan \frac{y_B - y_T^{III}}{x_B - x_T^{III}} \\ \pi - \arctan \frac{y_B - y_T^{IV}}{x_T^{IV} - x_B} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

对于移动平台当前姿态角  $\Phi_{\text{current}}$ , 以定位单元所在横向基准线的正半轴与中线长分割为 2 块区域, 故假设两种移动平台当前姿态情况作为讨论. 根据几何关系, 通过以下公式计算出两种情况下的姿态角, 如式(8)所示:

$$\Phi_{\text{current}} = \begin{bmatrix} \Phi_{\text{current}}^I \\ \Phi_{\text{current}}^{II} \end{bmatrix} = 2\pi - \begin{bmatrix} \Phi_{\text{course}}^I - (2\pi - (\pi - \alpha_1^I)) \\ (\pi - \alpha_1^{II}) + \Phi_{\text{course}}^{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1^I + 3\pi - \Phi_{\text{course}}^I \\ \Phi_{\text{course}}^{II} + \pi - \alpha_1^{II} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

通过式(6)获得定位坐标点, 且通过式(7)与式(8)计算得到目标角度  $\Phi_{\text{target}}$  以及移动平台当前姿态角  $\Phi_{\text{current}}$ , 由此可以根据获得的相关数据控制移动平台运动.

### 3.3 误差指标

本文所涉及的超声波定位装置的误差指标, 用于评估定位算法的位置偏移误差. 对其产生主要影响的是定点定位过程中目标点与估计点  $P_p$  之间距离  $d_p(P_a, P_p)$ , 跟随定位过程中估计点与直线目标路径  $L_p$  之间的垂直距离  $d_l(P_a, L_p)$  以及估计点与曲线目标路径  $C_p$  之间的垂直距离  $d_c(P_a, C_p)$ , 如式(9)~式(11)所示.

$$d_p = \sqrt{(x_p - x_t)^2 + (y_p - y_t)^2}, \quad (9)$$

$$d_l = \frac{|k_1 x_p - y_p + b_1|}{1 + k_1^2}, \quad (10)$$

$$d_c = \left| \sqrt{(x_p - x_t^c)^2 + (y_p - y_t^c)^2} - r_t \right|. \quad (11)$$

式中:  $k_1$  与  $b_1$  分别表示直线轨迹  $L_p$  的斜率与偏置;  $x_t^c$  与  $y_t^c$  为曲线目标路径  $C_p$  圆心坐标;  $r_t$  为曲线目标路径  $C_p$  半径.

## 4 实 验

本文涉及的室内定位装置, 决定其精度的硬件模块包含: 收发超声波装置、伺服电机与无线射频装置. 本文定位系统使用的超声波装置为 HC-SR04 超声波模块, 该模块由 1 个接收探头与 1 个发射探头组成. 将其发射探头遮挡住即可用于单独的超声波接收装置, 同理将接收探头遮住即可用于单独的超声波发射装置. 伺服电机使用的是 MYA CTUATOR 的 RMD-S 系列伺服电机, 无线通讯模块为 nRF24L01 射频模块.

### 4.1 定点定位实验

在实验区域内部均匀设定 11 个实验点 ((300, 0), (100, 200), (100, 450), (100, -200), (100, -450), (300, 250), (300, -250), (500, 200), (500, 450), (500, -200), (500, -450) cm), 将定位单元 B 分别置于各个实验点位置以测试定位装置的定点定位精度. 根据实验的条件设置, 定位单元 B 在每个点位测量 2 300 个数据. 以定位单元 A 所接收到的时间响应数据作为定位信息获取的来源(也可以将定位单元 A 与定位单元 B 的时间响应数据联合进行加权平均以提高定位精度, 但会牺牲数据获取的效率), 分别得到  $R_{ba}$  与  $R_{bb}$  两个超声波接收传感器的时间响应数据与角度数据, 如图 7 所示, 利用该数据通过式(6)计算得到的测试点定位数据如图 8 所示.

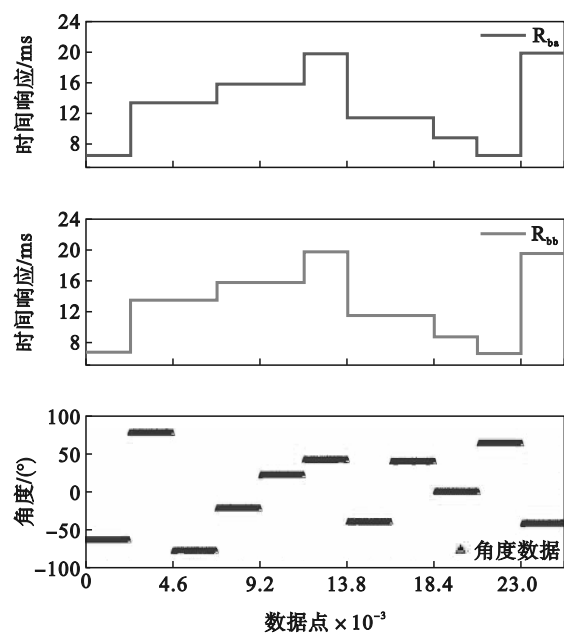


图 7 收集到的时间响应数据与角度数据  
Fig. 7 Collected time response data and angle data

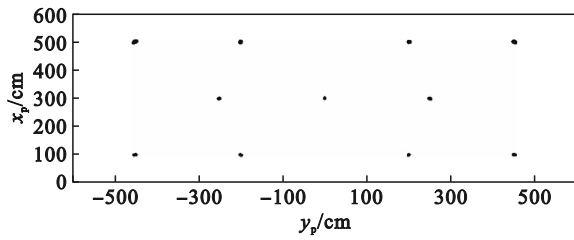


图 8 测试点原始定位数据

Fig. 8 Original location data of test points

为了减小误差,在每个位置分别使用估测算法估算该位置的精确位置,本文分别使用平均处理算法、PSO 粒子群算法以及 Markov 算法对定位点进行估计,图 9 为原始定位数据误差分布与各个算法的估算性能.

#### 4.2 跟随定位实验

为了指导移动平台在超声波定位中准确运动,本文在移动平台的行驶阶段分别使用了多种优化算法进行精确度对比.由于环境等因素影响,移动平台在行驶过程中不可避免会出现

位置偏移,为了优化这个过程,本文分别使用目标点导航方法(即移动平台从一个点出发向另一个目标点移动)、基于导航线方法(即移动平台保持自身与导航线处于合适距离内并前进)、插点法(即将一个导航线分解为多个定位点)和卡尔曼滤波算法,令移动平台沿直线移动 200 cm 的距离,不同方法收集到的定位数据如图 10 所示,平均误差见图 11.

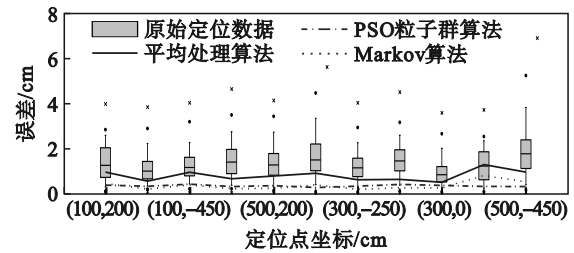


图 9 原始定位数据误差与各个优化算法性能

Fig. 9 Error of original location data and performance of each optimization algorithm

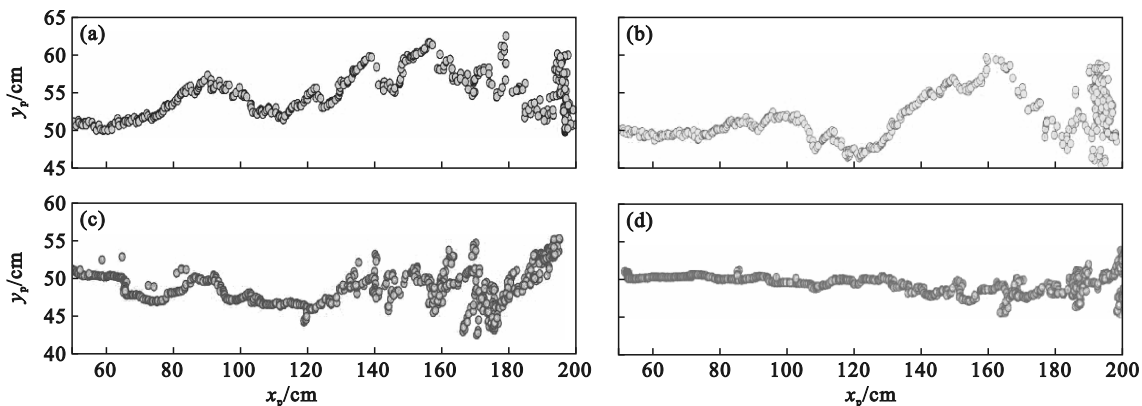


图 10 使用不同方法收集到的定位数据

Fig. 10 Location data collected using different methods

(a)—目标点导航方法; (b)—基于导航线方法; (c)—插点法; (d)—卡尔曼滤波算法.

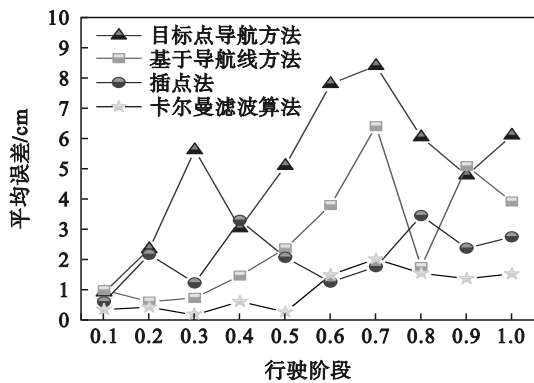


图 11 不同方法的定位数据误差

Fig. 11 Positioning data errors of different methods

在行驶阶段采用卡尔曼滤波算法修正移动平台行驶过程中产生的误差波动,使移动平台

在较大范围内进行连续行驶实验,其预设行驶轨迹见图 12,实际得到定位数据及其误差如图 13 所示.

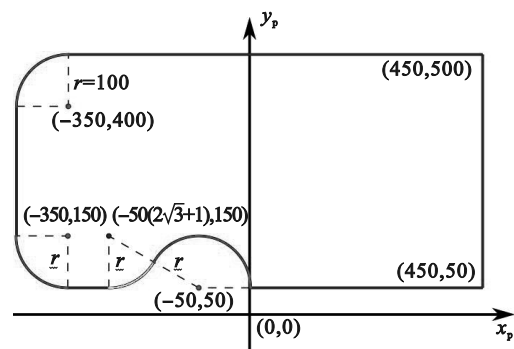


图 12 移动平台预设行驶轨迹

Fig. 12 Pre-set travel trajectory for the mobile platform

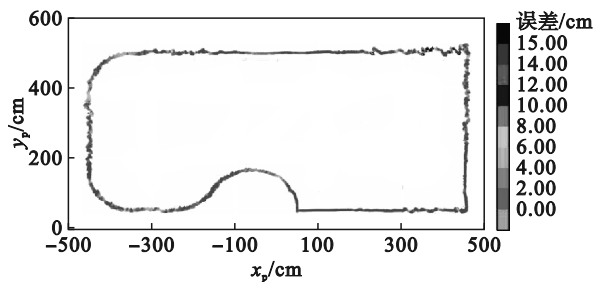


图 13 定位数据及其误差映射

Fig. 13 Location data and its error mapping

## 5 结 论

本文提出一种将到达时间(TOA)与到达角(AOA)相结合的室内定位系统,组成该系统的主要装置为超声波信号收发模块以及伺服电机.与传统的基于超声波室内定位方法不同,该定位系统主要依靠超声波收发模块获取的距离特征以及使用角度传感器获得的角度特征,实现在极坐标系下的精准定位.本文还建立了基于多传感器数据的实时坐标转换数学模型,通过定点定位实验与跟随定位实验的方式,测试了该室内定位方法在不同工况下的精度.在 10 m 定位范围内的实验结果表明,该定位系统的原始定点定位精度可达到 10 cm 以内,进一步通过均值估计、PSO 粒子群算法以及 Markov 算法的优化后,定点定位精度可保持在 5 cm 左右.而在跟随定位实验中,经过卡尔曼滤波算法优化后的定位精度可保持在 15 cm 以内.

### 参考文献:

- [ 1 ] Minami M, Fukuju Y, Hirasawa K, et al. DOLPHIN: a practical approach for implementing a fully distributed indoor ultrasonic positioning system[C]//Davies N, Mynatt E D, Siio I. International Conference on Ubiquitous Computing. Berlin: Springer, 2004: 347-365.
- [ 2 ] McCarthy M R, Duff P, Muller H L, et al. Accessible ultrasonic positioning[J]. *IEEE Pervasive Computing*, 2006, 5(4): 86-93.
- [ 3 ] 吴伟,刘兴刚,王忠实,等.多传感器融合实现机器人精确定位[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2007, 28(2): 161-164.  
(Wu Wei, Liu Xing-gang, Wang Zhong-shi, et al. Application of multisensor fusion to precise robot localization[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2007, 28(2): 161-164.)
- [ 4 ] Filonenko V, Cullen C, Carswell J. Investigating ultrasonic positioning on mobile phones [C]//2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN). Zurich, 2010: 1-8.
- [ 5 ] 赵海,张宽,朱剑,等.基于 TDOA 的超声波测距误差分析与改进[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2011, 32(6): 802-805.  
(Zhao Hai, Zhang Kuan, Zhu Jian, et al. Error analysis and improvement of ultrasonic distance measuring based on TDOA [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2011, 32(6): 802-805.)
- [ 6 ] 张明洋,陈剑,闻英友,等.基于滑动窗口最长公共子序列 Wi-Fi 指纹定位算法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(10): 1390-1394.  
(Zhang Ming-yang, Chen Jian, Wen Ying-you, et al. Wi-Fi fingerprint localization algorithm based on sliding window combined with longest common subsequence[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2014, 35(10): 1390-1394.)
- [ 7 ] Flores S, Geis J, Vossiek M. An ultrasonic sensor network for high-quality range-bearing-based indoor positioning[C]//2016 IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium (PLANS). Savannah, 2016: 572-576.
- [ 8 ] Zhang Y, Hsiung-Cheng L, Zhao J, et al. A multi-DoF ultrasonic receiving device for indoor positioning of AGV system [C]//International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C). Taichung, 2018: 97-100.
- [ 9 ] Comuniello A, Moschitta A, De Angelis A, et al. Ultrasound TDoA positioning using the best linear unbiased estimator and efficient anchor placement [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(5): 2477-2486.
- [ 10 ] Chew M T, Alam F, Legg M, et al. Accurate ultrasound indoor localization using Spring-Relaxation technique [J]. *Electronics*, 2021, 10(11): 1290-1306.
- [ 11 ] Gabbriellini A, Xiong W, Schott D J, et al. An echo suppression delay estimator for angle-of-arrival ultrasonic indoor localization[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-12.
- [ 12 ] Fischer G, Bordoy J, Schott D J, et al. Multimodal indoor localization: fusion possibilities of ultrasonic and bluetooth low-energy data [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(6): 5857-5868.
- [ 13 ] 蒋林,闫继宏,臧希喆,等.一种新的超声波绝对定位方法[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2009, 39(1): 188-193.  
(Jiang Lin, Yan Ji-hong, Zang Xi-zhe, et al. New method for ultrasonic absolute localization [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2009, 39(1): 188-193.)
- [ 14 ] 李昌禄,苏寒松.超声波定位系统的研究[J]. *实验室研究与探索*, 2013, 32(2): 39-44.  
(Li Chang-lu, Su Han-song. An ultrasonic positioning system [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2013, 32(2): 39-44.)
- [ 15 ] 王凡,彭勇.基于 TDOA 的室内超声波定位方法的改进[J]. *计算机技术与发展*, 2014, 24(6): 250-253.  
(Wang Fan, Peng Yong. Improved indoor location method for ultrasonic system based on TDOA [J]. *Computer Technology and Development*, 2014, 24(6): 250-253.)
- [ 16 ] Yang Y, Xiao J H, Liu Z, et al. Indoor ultrasonic positioning system based on CDMA-TDOA and its ultrasonic signal analysis [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 472/473/474/475: 1017-1022.
- [ 17 ] Thio V, Aparicio J, Anonsen K B, et al. Fusing of a continuous output PDR algorithm with an ultrasonic positioning system [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022(3): 2464-2474.