

## 一种非视距三维超声波室内定位系统研究

孙冰曼, 张兴红

重庆理工大学 两江国际学院, 重庆 401135

**摘要:**目的 针对超声波室内定位系统在非视距定位中精度较低的问题,为减少非视距环境误差与时钟同步等硬件误差,从定位系统整体出发提出一种非视距环境下基于对射式测距的超声波定位系统。方法 利用差分修正 Chan-Taylor 算法结合 Chan 算法与 Taylor 级数展开算法的优势,通过 Chan-Taylor 算法估计空间中已知坐标点并记录其误差信息,以实际坐标为参考点,运用相邻范围内参考点对未知点差分加权,修正该点经 Chan-Taylor 算法的初始估计坐标,得到最终位置。为简化定位系统复杂度,提高视距环境定位精度,提出改进差分修正 Chan-Taylor 算法,减少初始参考点密度,将符合参考点最小间隔条件的待测点经差分修正后的估计坐标标记为新参考点,优化原参考点体系误差信息分布情况。结果 算法仿真实验结果表明:在非视距环境下,差分修正 Chan-Taylor 算法在不同参考点分布区域的平均误差与 Chan 算法和 Chan-Taylor 算法相比减小 6.43%到 37.46%;改进差分修正 Chan-Taylor 算法在视距定位中平均定位误差减少至少 11.15%,均方根误差值  $F_{RMSE}$  降低 22.59%。搭建超声波室内定位系统以验证改进差分修正算法的定位精度,实验结果表明:定位误差范围在 3~7.5 cm,其中 90%的误差值小于 6 cm,与 Chan-Taylor 算法相比提高 28.23%。结论 该超声波室内定位系统在非视距定位中精度有明显提高,在视距定位中提升较小。可通过提高 Chan-Taylor 算法精度和改进参考点加权函数以优化定位算法;通过优化超声波接收端信号识别方法,增大发射端信号范围以在硬件方面进一步提升该系统定位精度。

**关键词:**超声波定位;非视距;定位算法;三维定位

中图分类号:TP212;TB559 文献标识码:A doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0004.001

### Research on Non-line-of-sight 3D Ultrasonic Indoor Positioning System

SUN Bingman, ZHANG Xinghong

Liangjiang International College, Chongqing University of Technology, Chongqing 401135, China

**Abstract: Objective** In response to the issue of low precision of ultrasonic indoor positioning system in non-line-of-sight positioning, a novel ultrasonic positioning system based on retroreflective ranging in non-line-of-sight environments was proposed starting from the overall positioning system to reduce errors in non-line-of-sight environments and hardware errors such as clock synchronization. **Methods** Utilizing the advantages of the differential corrected Chan-Taylor algorithm combined with the Chan algorithm and Taylor series expansion algorithm, the Chan-Taylor algorithm was used to estimate the known coordinate points in space and record their error information with actual coordinates as reference points. By differentially weighting unknown points with neighboring reference points within a certain range, the initially estimated coordinates obtained by the Chan-Taylor algorithm were corrected to obtain the final position. In order to simplify the complexity of the positioning system and improve the positioning accuracy in line-of-sight environments, an improved differential corrected Chan-Taylor algorithm was proposed. This involved reducing the initial density of reference points and marking the estimated coordinates of target points that meet the minimum interval conditions for reference points after

收稿日期:2023-04-18 修回日期:2023-05-27 文章编号:1672-058X(2024)04-0001-09

基金项目:国家自然科学基金项目(52175454)。

作者简介:孙冰曼(1997—),女,重庆潼南人,硕士研究生,从事超声波传感器精密测量相关研究。

通讯作者:张兴红(1970—),男,湖北荆门人,教授,博士,从事传感器精密测量相关研究。Email:zxh@cqut.edu.cn。

引用格式:孙冰曼,张兴红.一种非视距三维超声波室内定位系统研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2024,41(4):1—9。

SUN Bingman, ZHANG Xinghong. Research on non-line-of-sight 3D ultrasonic indoor positioning system[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(4): 1—9.

differential correction as new reference points to optimize the distribution of error information in the original reference point system. **Results** Simulation experiments of the algorithm showed that in non-line-of-sight environments, the average error in different reference point distribution areas of the differential corrected Chan-Taylor algorithm was reduced by 6.43% to 37.46% compared with the Chan algorithm and Chan-Taylor algorithm. The improved differential corrected Chan-Taylor algorithm reduced the average positioning error in line-of-sight positioning by at least 11.15%, with a decrease of 22.59% in root mean square error. The positioning accuracy of the improved differential corrected algorithm was validated through the construction of an ultrasonic indoor positioning system, with experimental results showing a positioning error range of 3 cm to 7.5 cm, where 90% of the errors were less than 6 cm, representing a 28.23% improvement compared with the Chan-Taylor algorithm. **Conclusion** The ultrasonic indoor positioning system shows a significant improvement in accuracy in non-line-of-sight positioning, with a smaller improvement in line-of-sight positioning. The positioning algorithm can be optimized by improving the accuracy of the Chan-Taylor algorithm and enhancing the reference point weighting function. Hardware improvements, such as optimizing the ultrasonic receiver signal recognition method and increasing the signal range at the transmission end, can further enhance the positioning accuracy of the system.

**Keywords:** ultrasonic positioning; non-line-of-sight; positioning algorithm; 3D positioning

## 1 引言

国内室内定位相关研究蓬勃发展,超声波室内定位技术是室内定位技术的重要组成部分之一。超声波具有传播速度慢、传播方向性强、传播能量集中的特性,不易受到烟雾、电磁、光线等环境因素的影响,但超声波波长短,空气中遇障碍物易散射,特别是人体能吸收大量超声波能量<sup>[1-3]</sup>,因此超声波定位可搭载于智能移动机器,应用在人流密度低的大型仓库、植物温室、地下停车场、智能流水线工厂等场景。

在超声波的室内定位研究中,An 等<sup>[4]</sup>运用麦克风非线性效应将部署的两种不同频率超声波信标做低频处理,该定位系统能降低超声波对人耳的伤害,基于智能设备与超声信标实现厘米级定位,但该系统定位距离较小,硬件设计复杂且能耗较大;黄婷等<sup>[5]</sup>结合多普勒频移和卡尔曼滤波提高了超声波测距精度,实现室内无人机路径跟踪,但该方法受超声波信噪比影响较大,对超声波换能器性能有较高要求;马子耀等<sup>[6]</sup>利用 BP 神经网络对 RSSI(Received Signal Strength Indicator)值与超声波数据进行训练,同时实现对目标距离和方位的测量,由于该系统运用反射式超声测距数据定位目标方位,受非视距影响较大,当目标较多时容易产生干扰;周艳等<sup>[7]</sup>在二维空间中根据基站与未知点的位置关系,通过定位基站优化选择算法选出合适的基站位置并计算未知节点的位置,该方法在二维定位中有较高精度但并未验证是否适用于三维空间;燕学智等<sup>[8]</sup>针对超声波三维定位算法中存在的运算误差分析基线长度与误差传递关系,生成误差传递模型,通过实验得到了不同基线长度下误差敏感度分布,但并未针对获得的分布模型提出相应的优化方法;Li 等<sup>[9]</sup>根据不同基站节点的 NLOS((Non Line of Sight)误差建立数据库,对未知节点进行动态修正定位算法,生成校正图,

该方法抑制了 NLOS 误差但定位覆盖面不全且数据库生成复杂;方李林等<sup>[10]</sup>加权 Chan 算法和 Chan-Taylor 算法的估计值方法抑制了非视距误差,定位精度提升了 7.5%,但该算法由于需多次测量 TDOA 值,故实时性较差,且实验中模拟噪声较小,与实际非视距环境有一定差距。

超声波室内定位系统的主要误差来源:一为 NLOS、环境温度等导致的超声波测距误差;二为硬件设备时钟同步、内部噪声等系统误差;三为定位算法导致的误差。为同时减少 NLOS 环境误差与时钟同步等硬件误差,从定位系统整体出发,提出一种非视距环境下基于对射式测距的超声波定位方法。以三点定位法为基础,运用空间已知参考点所携带的误差信息与邻近未知点相关原理,通过加权得到校正值,以减少测量误差和系统误差,从而提高定位精度。

## 2 定位算法描述

超声波定位系统基于超声波测距原理,实现三维定位需至少 4 个超声波探头作为接收端,1 个探头作为发射端,测量超声波发射端到接收端的信号传播时间,通过传播时间与超声波传播速度的乘积得到传播距离,将传播距离作为初始数据代入定位算法。

### 2.1 Chan-Taylor 定位算法

超声波定位主要运用三边定位法,常用的算法有到达时间法(TOA)、到达时间差法(TDOA)、到达角度法(AOA)。TOA 算法测算超声波收发端信号传播距离作为已知数据,用发射端待测坐标与接收端已知坐标建立三元二次方程,最小二乘法求解得到发射端坐标;TOA 算法需精确测量超声波信号的传播时间,对收发端同步有较高要求,硬件较为复杂<sup>[11-12]</sup>。AOA 算法需测量接收端超声波信号的接受角度,建立三元二次方程,求解得到定位结果,但测量超声波传播角度难度较

大,算法 NOLS 定位精度相对较低<sup>[13]</sup>。本实验采用 TDOA 算法,设发射端待测点坐标为  $(x, y, z)$ ,接收端坐标为  $(x_i, y_i, z_i), i=1, 2, \dots, n$  ( $n$  为正整数),已知发射端到各接收端到达的传播时间差,经距离公式得到各距离差值  $d_{i,1}, i=2, 3, \dots, n$ ,即 TDOA 值,并建立双曲面三元二次方程组公式如式(1)所示:

$$\begin{cases} d_{2,1} = d_2 - d_1 = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} - \\ \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \\ d_{3,1} = d_3 - d_1 = \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} - \\ \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \\ \vdots \\ d_{n,1} = d_n - d_1 = \sqrt{(x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_n - z)^2} - \\ \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \end{cases} \quad (1)$$

TDOA 算法包含 Fang 算法、Chan 算法、Taylor 级数展开法。Fang 算法与 Chan 算法的本质是通过数式变换将双曲线方程组变换为某个变量的一元二次方程组进行求解,然后根据客观条件排除模糊性更大的解。Fang 算法的估值不随基站增多而变化,Chan 算法经过两次最小二乘法求解双曲线方程组,随基站增加估算而趋向精确值。Taylor 级数展开法首先选择某初始坐标一级迭代,运用最小二乘法求解局部最小误差并将结果作为下级迭代的初始值,直到误差小于规定的阈值。Taylor 级数展开法精度高,但初始坐标对定位精确度有巨大影响,与 Fang 算法、Chan 算法相比,其计算量较大,复杂度高<sup>[14]</sup>。

三种算法各有优缺点,为保证精确度较高的同时降低运算量,因此提出了 Chan-Taylor 融合算法:运用 Chan 算法得到 Taylor 展开迭代初始值<sup>[15]</sup>,减少迭代次数,降低运算量。其流程步骤如下:Chan 算法求解双曲线方程得到待定位物体坐标  $X_0(x_0, y_0, z_0)$ ;  $X_0(x_0, y_0, z_0)$  作为迭代初始值进行 Taylor 级数展开,计算最小二乘解的范数<sup>[16]</sup>;判断范数是否满足阈值,如果不满足,继续迭代,范数满足阈值,输出估计坐标。

## 2.2 差分修正 Chan-Taylor 算法原理

尽管超声波不受电磁波、光线等环境干扰,但能量随传播距离增大而衰减,实验表明:40 kHz 超声信号在无障碍传输 1 m 内呈线性衰减,在 1 m 处达到 40 dB 的衰减<sup>[17]</sup>。室内环境复杂,超声波传播过程中还会发生多重反射、散射、穿透等现象,导致超声波幅值与信号包络发生变化,影响超声波传播时间的测量,增大的 TDOA 值误差,导致定位算法精度下降,同时硬件系统的内部噪声、时钟频率等因素,也会导致误差增大。

环境造成的测量误差是影响超声波定位精度的主要因素之一,为提高复杂环境下超声波定位系统的准

确性,提出利用差分修正算法对 Chan-Taylor 算法的估计结果进行误差优化。差分修正算法的原理是待定位目标在一定环境范围内的测距误差具有相关性,利用已知点的误差作为校正值,校正 TDOA 初始测量数据,以达到削减误差的目的。

假设超声波接收端坐标为  $B_i = (x_{Bi}, y_{Bi}, z_{Bi}), i=1, 2, 3, 4$ ;待定位目标的真实坐标为  $A = (x, y, z)$ 。拟定空间选取参考点,设参考点坐标为  $C_k = (x_k, y_k, z_k), k=1, 2, \dots, n$  ( $n$  为正整数);运用 Chan-Taylor 算法得到参考点估计位置  $C'_k = (x'_k, y'_k, z'_k), k=1, 2, \dots, n$ 。接收端  $B_i$  与  $C'_k$  的距离如式(2)所示:

$$D_{(k,i)} = \sqrt{(x'_k - x_{Bi})^2 + (y'_k - y_{Bi})^2 + (z'_k - z_{Bi})^2} \quad (2)$$

参考点  $C_k$  到第  $i$  个接受点  $B_i$  的真实距离为  $d_{(k,i)}$ ,如式(3)所示:

$$d_{(k,i)} = \sqrt{(x_k - x_{Bi})^2 + (y_k - y_{Bi})^2 + (z_k - z_{Bi})^2} \quad (3)$$

距离差分信息如式(4)所示:

$$\Delta d_{(k,i)} = D_{(k,i)} - d_{(k,i)} \quad (4)$$

表示参考点  $C_k$  相对于接收端  $B_i$  的误差校正值。

$A' = (x', y', z')$  为待测点  $A$  的估计值,与接收端  $B_i$  的距离为  $r_i$ ,经校正后的修正距离  $r'_i$  如式(5)所示:

$$r'_i = r_i - \Delta d_{(k,i)} \quad (5)$$

运用  $r'_i$  计算得到修正后的 TDOA 值,代入 Chan-Taylor 算法得到最终估计坐标  $A_0 = (x_0, y_0, z_0)$ 。

为提高校正准确度,避免单一参考点校正信息不全面,选取距离估计坐标  $A' = (x', y', z')$  最近的  $k$  个参考点,按照估计坐标与参考点的距离远近对校正信息  $\Delta d_{(k,i)}$  加权平均。距离越近,参考点占据的权重越大,与待测点的相关性越强;距离越远,参考点权重占据越小,与待测点的相关性越弱。

构建元素和为 1 的权重数组  $G$ :

$$G = \left[ \frac{L_1}{L}, \frac{L_2}{L}, \dots, \frac{L_k}{L} \right]$$

$\frac{L_k}{L}$  为估计坐标与参考点之间距离的倒数,表示参考点  $k$  的校正值权重:

$$\frac{L_k}{L} = \frac{L_k}{\sum_{k=1}^m L_k}$$

$L_k$  是估计坐标与参考点  $C_k$  距离的倒数,如式(6)所示:

$$L_k = \frac{1}{\sqrt{(x' - x_k)^2 + (y' - y_k)^2 + (z' - z_k)^2}} \quad (6)$$

经加权平均的校正值  $\overline{\Delta d_{(k,i)}}$  为式(7):

$$\overline{\Delta d_{(k,i)}} = \sum_{k=1}^m \frac{L_k}{L} * \Delta d_{(k,i)} \quad (7)$$

将式(6)代入式(4),得到加权平均后的修正距离值:

$$r'_i = r_i - \overline{\Delta d_{(k,i)}}$$

不同参考点的校正值受环境、硬件影响存在差异,加权平均法综合估计坐标最小范围内多个参考点的差分校正值,减少单个参考点校正值的不确定性,抑制环境对定位结果的影响。差分修正 Chan-Taylor 算法流程如图 1 所示。

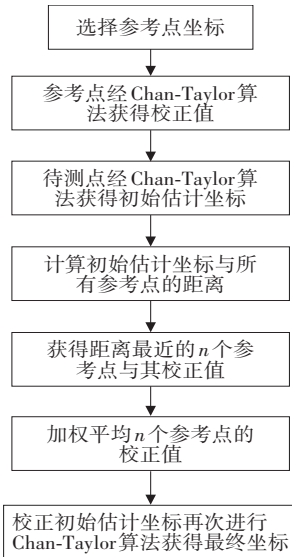


图 1 差分修正 Chan-Taylor 算法流程图

Fig.1 Flow chart of differential correction Chan-Taylor algorithm

### 3 算法仿真与定位算法改进

#### 3.1 差分修正 Chan-Taylor 算法仿真

MATLAB 平台构建 100 cm×100 cm×100 cm 三维空间,实现三维空间定位需至少 4 个超声波探头作为信号接收端。实验表明:Chan-Taylor 算法在只有 4 个接收端时,定位误差会出现无效数据,定位精度极不稳定,随着接收端数量增加,定位精度有一定提高<sup>[18]</sup>。因此本实验布置 5 个接收端,坐标分别为  $BS_1(0,0,100)$ ,  $BS_2(100,0,100)$ ,  $BS_3(0,100,100)$ ,  $BS_4(100,100,100)$ ,  $BS_5(50,50,100)$ 。一个超声波探头作为待定目标,在拟定空间内以 20 cm 为间隔选择参考点,如图 2 所示。

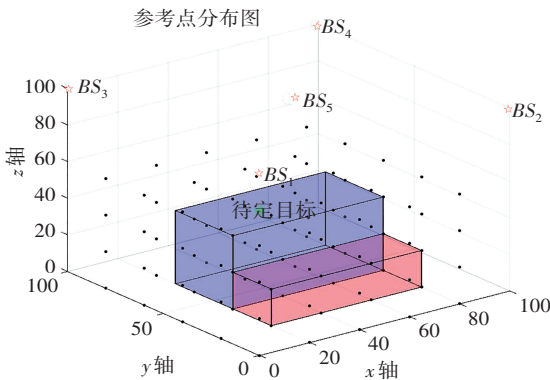


图 2 模拟测量环境与参考点分布图

Fig.2 Simulated measurement environment and reference points distribution map

为验证差分修正 Chan-Taylor 算法能有效减小非视距环境下的定位误差,运用噪声模拟非视距环境造成的测量误差。假设噪声服从高斯分布,在对射式超声波测距视距情况下,存在最大 0.3 cm 的误差<sup>[19]</sup>,图 2 空白区域用噪声方差  $\sigma = 0.25$  模拟视距环境;非视距障碍物为钢材等表面光滑的材料时,超声波信号被大幅反射导致距离测量结果误差范围为 6~7 cm<sup>[20]</sup>,图 2 红色区域用噪声方差  $\sigma = 4.0$  模拟;图 2 蓝色区域用  $\sigma = 2.0$  模拟 3~4 cm 测量误差的非视距环境。

差分修正 Chan-Taylor 算法中参考点的选择至关重要。为验证选择参考点数量对定位算法稳定性的影响,在图 2 模拟环境中,分别在  $\sigma = 0.25, \sigma = 2.0, \sigma = 4.0$  三个区域内选择 200 个随机点,算法选择参考点数量从 3 个依次递增至 8 个,计算  $F_{RMSE}$  值如表 1、表 2、表 3 所示,图 3、图 4 分别为  $\sigma = 2.0$  与  $\sigma = 4.0$  环境下不同参考点数量的  $F_{RMSE}$  (均方根误差,Root Mean Square Error) 值。

表 1  $\sigma = 0.25$  时的  $F_{RMSE}$  值

Table 1  $F_{RMSE}$  values when  $\sigma = 0.25$

参考点数量	3	4	5	6	7	8
$F_{RMSE}$	0.023 3	0.022 1	0.023 4	0.022 2	0.022 7	0.023 5

表 2  $\sigma = 2.0$  时的  $F_{RMSE}$  值

Table 2  $F_{RMSE}$  values when  $\sigma = 2.0$

参考点数量	第 1 次实验	第 2 次实验	第 3 次实验	第 4 次实验	第 5 次实验
3	2.7E+18	1.425	1.1E+11	1.8E+18	1.405
4	1.446	1.460	1.465	1.426	1.421
5	1.489	1.442	1.338	1.593	1.360
6	1.414	1.436	1.406	1.343	1.432
7	1.466	1.453	1.312	1.567	1.459
8	1.417	1.432	1.419	1.389	1.457

表 3  $\sigma = 4.0$  时的  $F_{RMSE}$  值

Table 3  $F_{RMSE}$  values when  $\sigma = 4.0$

参考点数量	第 1 次实验	第 2 次实验	第 3 次实验	第 4 次实验	第 5 次实验
3	5.7E+18	1.2E+9	6.379	6.403	6.1E+10
4	6.018	5.863	5.701	5.752	5.647
5	5.943	5.645	5.908	5.687	5.599
6	5.441	5.867	5.764	5.543	5.862
7	6.247	5.997	5.977	2.3E+18	5.5E+18
8	5.664	5.310	5.554	5.510	5.816

表 1 数据表明:差分修正 Chan-Taylor 算法在  $\sigma = 0.25$  时不同参考点数量下的  $F_{RMSE}$  值差距很小,对算

法精确度的影响可忽略不计。

表 2、图 3 表明: $\sigma=2.0$  时,在 3 个参考点时,存在无效值,在 4、6、8 个参考点时, $F_{RMSE}$  值相差很小,可根据需要选择合适的参考点数量。

表 3、图 4 表明: $\sigma=4.0$  时,选取 3 个和 7 个参考点数量,存在无效值,在 4、5、6、8 个参考点数量的情况下, $F_{RMSE}$  值相差很小,本研究选择 8 个参考点进行加权平均。

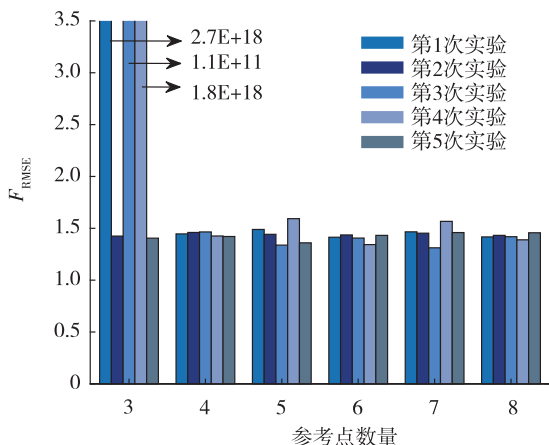


图 3  $\sigma=2.0$  时不同参考点数量下的  $F_{RMSE}$

Fig. 3  $F_{RMSE}$  values under different numbers of reference points when  $\sigma=2.0$

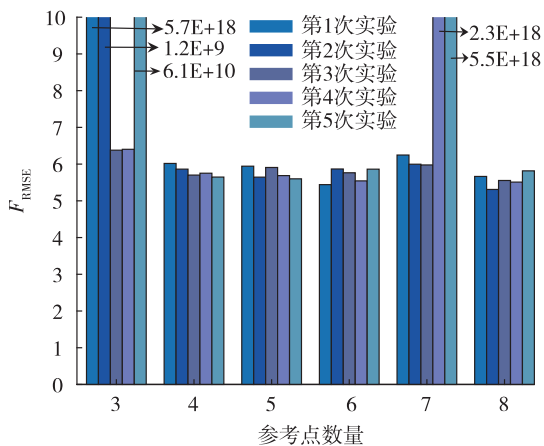


图 4  $\sigma=4.0$  不同参考点数量下的  $F_{RMSE}$

Fig. 4  $F_{RMSE}$  values under different numbers of reference points when  $\sigma=4.0$

为充分比较三维空间中 Chan 算法、Chan-Taylor 算法与差分修正 Chan-Taylor 算法的定位性能,在图 2 的环境下,分别在红色、蓝色、白色三个区域随机选取 200 个待测量点,各待测点选取的参考点与待测点位于的噪声环境保持一致,图 5、图 6、图 7 分别为  $\sigma=0.25, \sigma=2.0, \sigma=4.0$  区域内 200 个随机测量点三种定位算法累计函数分布图(Cumulative Distribution Function, CDF)。

图 5 差分修正后的 Chan-Taylor 算法 90% 的误差小于 0.06 cm, 区间  $[0, 0.04]$  累计分布函数上升最陡

峭,该区间分布的定位误差最多。图 6 差分修正后的 Chan-Taylor 算法 90% 的误差小于 2.50 cm, 区间  $[0, 2]$  累计分布函数上升最陡峭。图 7 差分修正后的 Chan-Taylor 算法 90% 的误差小于 12 cm, 区间  $[0, 7]$  累计分布函数上升最陡峭。三种情况下,该算法与 Chan 算法和 Chan-Taylor 算法相比,误差分布更集中且较大误差值数量较少。

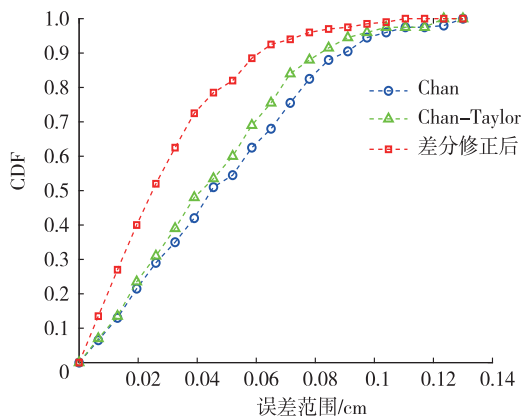


图 5  $\sigma=0.25$  时的 CDF

Fig. 5 CDF when  $\sigma=0.25$

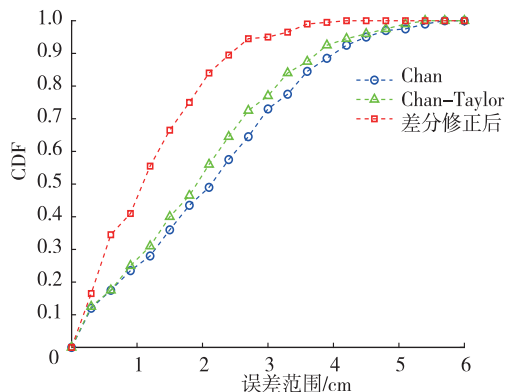


图 6  $\sigma=2.0$  时的 CDF

Fig. 6 CDF when  $\sigma=2.0$

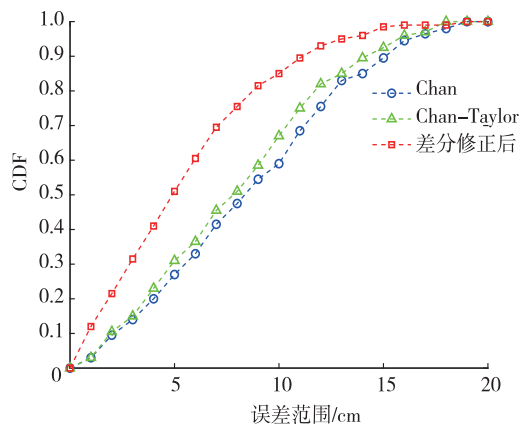


图 7  $\sigma=4.0$  时的 CDF

Fig. 7 CDF when  $\sigma=4.0$

图 8 表示不同噪声环境下,200 个测量点的平均误

差与  $F_{REMS}$  值。对比发现:差分修正 Chan-Taylor 算法表现出较好的稳定性和准确性,该算法平均误差相对 Chan 算法在三种噪声环境下减少 35.02% 以上,均方根误差减少 31.26% 以上;与 Chan-Taylor 算法相比,平均误差至少减少 30.10%,均方根误差至少减少 26.62%。综合分析比较,参考点分布于单一环境下的差分修正 Chan-Taylor 算法在 90% 测量点的定位误差更小,误差分布更集中,奇异误差值较少,均方根误差和平均误差更小。

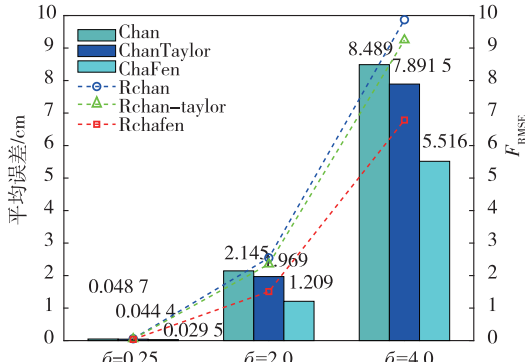


图 8 三种算法的平均误差与  $F_{RMSE}$  值

Fig. 8 The average error and  $F_{RMSE}$  values of three algorithms

实际应用中,待测物体所处的环境更加复杂,差分修正算法中参考点往往不属于同一噪声区。在三类噪声区域中,选择以待测点为圆心,均匀分布于 0.25/2.0( $\sigma$ )、0.25/4.0( $\sigma$ )、2.0/4.0( $\sigma$ )与 0.25/2.0/4.0( $\sigma$ )区域的随机待测点为参考点,观测同等距离下参考点较大误差修正信息对定位误差的影响,各待测点循环测量 100 次的平均误差分别如表 4、表 5、表 6 所示。

表 4  $\sigma=2.0$  时的平均误差

Table 4 Average errors when  $\sigma=2.0$

参考点分布	平均误差/cm		
	Chan	Chan-Taylor	差分修正 Chan-Taylor
0.25/2.0	2.198 3	2.018 1	1.526 8
0.25/4.0	2.260 7	2.080 9	1.301 4
2.0/4.0	2.106 7	1.932 1	1.330 0
0.25/2.0/4.0	2.163 7	1.985 3	1.256 3

表 5  $\sigma=4.0$  时的平均误差

Table 5 Average errors when  $\sigma=4.0$

参考点分布	平均误差/cm		
	Chan	Chan-Taylor	差分修正 Chan-Taylor
0.25/2.0	7.921 7	7.419 7	6.942 3
0.25/4.0	7.559 3	7.034 5	6.200 2
2.0/4.0	8.235 0	7.662 5	6.578 3
0.25/2.0/4.0	8.043 9	7.488 6	6.660 5

表 6  $\sigma=0.25$  时的平均误差

Table 6 Average errors when  $\sigma=0.25$

参考点分布	平均误差/cm		
	Chan	Chan-Taylor	差分修正 Chan-Taylor
0.25/2.0	0.059 9	0.055 1	0.756 1
0.25/4.0	0.054 7	0.050 2	1.541 4
2.0/4.0	0.048 1	0.044 0	1.576 8
0.25/2.0/4.0	0.060 1	0.055 4	1.540 8

表 4 所示:待测点处于噪声方差 2.0 区域,4 种参考点分布情况下,差分修正 Chan-Taylor 算法的平均误差均有所降低,与 Chan 算法相比,平均误差至少减少 30%,与 Chan-Taylor 算法相比,减少 24.34% ~ 37.46%,4 种情况平均减少 32.34%;在参考点分布在 0.25/2.0/4.0( $\sigma$ )区域时,与其他分布情况比,该算法定位性能更优秀。

表 5 所示:待测点处于噪声方差 4.0 区域,4 种参考点分布情况下,差分修正 Chan-Taylor 算法的平均误差有所降低,与 Chan 算法相比,平均误差至少减少 12%,与 Chan-Taylor 算法相比,减少 6.43% ~ 14.15%,4 种情况平均减少 10.88%;在参考点分布在 0.25/4.0( $\sigma$ )区域时,与其他分布情况相比,该算法定位性能更优秀。

表 4 和表 5 表明待测点位于噪声较大的环境时差分修正 Chan-Taylor 算法定位准确度较高。

但表 6 中待测点位于低噪声区域时,复杂分布的参考点导致差分修正 Chan-Taylor 算法的误差显著变大,且随着高噪声区域参考点的增多呈上升趋势。分析可知:参考点在高噪声区域表现为相对较大的误差修正信息,加权平均后距离校正值趋向高噪声区误差修正值,反而使校正后的距离产生偏离,导致最终误差不符合待测点测量环境。

### 3.2 改进的差分修正 Chan-Taylor 定位算法

上述实验存在两个主要问题:空间中需测量的初始参考点较多,增加了室内定位系统的复杂度;分析表 6 的实验数据,当待测点处于低噪声环境时,定位结果受携带较大误差信息的参考点影响,出现差分修正算法后定位误差大于差分修正算法前定位误差的情况。

为解决上述问题,提出在减少初始参考点数量的基础上,将符合参考点最小间隔条件的待测点经差分修正 Chan-Taylor 算法后的估计坐标为新参考点,使参考点及其携带的修正信息更准确,同时减少定位系统的操作复杂程度。仿真实验中,待测点位于 0.25 噪声方差区域,参考点分布情况为 0.25/2.0( $\sigma$ )区

域、0.25/4.0 ( $\sigma$ ) 区域、2.0/4.0 ( $\sigma$ ) 区域与 0.25/2.0/4.0 ( $\sigma$ ) 区域。8 个初始参考点分布为 0.25 ( $\sigma$ ) 区域 3 个、2.0 ( $\sigma$ ) 区域 2 个、4.0 ( $\sigma$ ) 区域 3 个,且 8 个点为正方体的各个顶点,每次实验初始参考点分布情况相同。在待测点, $z$  轴与  $x$  轴固定, $y$  轴水平移动,模拟现实中移动器械水平运动。移动中,将待测点经定位算法后的估计坐标记为新的参考点,保存新参考点的校正值为误差信息值。新参考点的误差信息为差分修正 Chan-Taylor 算法的估计值与各接收端的距离减去初次 Chan-Taylor 算法的估计值与对应接收端的距离再减去该点运算过程中的距离修正值。设待定位物体坐标为  $A(x, y, z)$ ,接收端坐标为  $B_i(x_i, y_i, z_i), i=1, 2, \dots, n$  ( $n$  为大于 4 的正整数),待定位物体经 Chan-Taylor 算法定位后的初始估计坐标为  $A_0(x_0, y_0, z_0)$ ,经差分修正算法后的最终坐标为  $A_0'(x_0', y_0', z_0')$ 。新参考点的误差信息如式(8)所示:

$$\Delta r_i = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} - \sqrt{(x_0' - x_i)^2 + (y_0' - y_i)^2 + (z_0' - z_i)^2} - \overline{\Delta d_i} \quad (8)$$

$\overline{\Delta d_i}$  为式(7)中的校正值。新参考点生成流程如下:待测点经差分修正 Chan-Taylor 算法获得估计坐标;计算估计坐标与所有参考点的距离  $d_i$ ;比较  $d_i$  与  $d_{\min}$  (参考点最小分布密度)的大小,如果每一个  $d_i$  都大于  $d_{\min}$ ,则保存该估计坐标与其误差信息  $\Delta r_i$  为新参考点;如果存在  $d_i$  小于等于  $d_{\min}$ ,则不保存该估计坐标为新参考点。

改进后的差分修正算法与表 6 中改进前的差分修正算法的平均误差和均方根误差比较如图 9 所示。

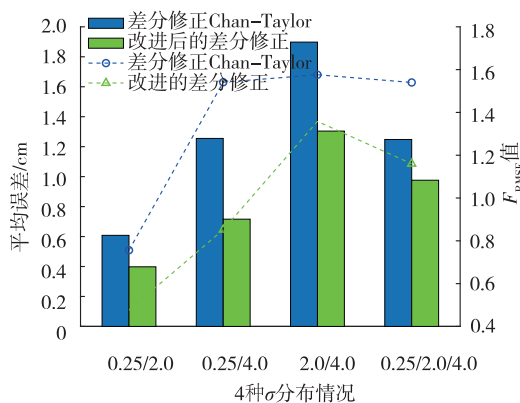


图9 改进前后差分修正 Chan-Taylor 算法的平均误差和  $F_{RMSE}$

Fig.9 Average errors and  $F_{RMSE}$  values of differential correction Chan-Taylor algorithm before and after improvement

改进后的算法无论是平均误差还是均方根误差与改进前相比都有明显降低,平均误差最小降低 0.208 3 cm,最大降低 3.126 cm;均方根误差最小降低 0.341,最大减少 0.692。分析可知:生成新参考点可以消减较大误差修正值造成的误差增大,避免新参考点数量过多对硬

件存储造成的负担,设置参考点间最小间距以控制总参考点数量保持在合理范围内。

## 4 定位系统与实验结果

### 4.1 定位系统设计

超声波定位系统的最终总成结构如图 10 所示。该定位系统平台采用铝材质框架搭建,框架尺寸为 50 cm×50 cm×190 cm 的长方体,在框架的顶部安置 5 个超声波接收器,位于 50 cm×50 cm 正方形 4 个顶点和对角线的交点处。超声波接收器通过电线与 STM32f103 单片机的 I/O 口相连,温度传感器 DS18B02 和 Zigbee 无线设备同样与 STM32f103 单片机链接。地面铺有网格为 1 cm 的方格纸,将木板置于地板上充当障碍物,记超声波发射端发射探头的圆心位置为整个发射端的坐标,放置在系统可测范围内,接通发射端电源,开始定位。



图 10 超声波室内定位系统

Fig.10 Ultrasonic indoor positioning system

图 11 为超声波室内定位系统图 10 的简化图示。给超声波发射端通电,搭载于发射端的 ZIGBEE 设备发送启动信号,一方面有启动信号触发超声波传感器的触发信号发射探头发射超声波;另一方面搭载于 STM32 微控制处理器上的 ZIGBEE 设备接收到启动信号并通过 I/O 口传输给 STM32,同时 STM32 发送触发信号给超声波接收器。超声波接收器开始计时,内部定时器生成高电平,直到接收到超声波信号定时器的电平变低,将生成的高电平方波传输回 STM32 处理器,通过输入捕获获得超声波传输时间,温度传感器测得实时温度,运用气体介质中超声波声速与环境温度公式<sup>[21]</sup>,获得超声波实时声速,乘以传播时间得到传播距离,代入差分修正 Chan-Taylor 算法,获得定位结果。如果该结果符合生成新参考点的要求,将该位置存储在 STM32 内部的参考点集合,最后可以将 STM32 处理器通过串口与上位机(本实验为笔记本电脑)通信。

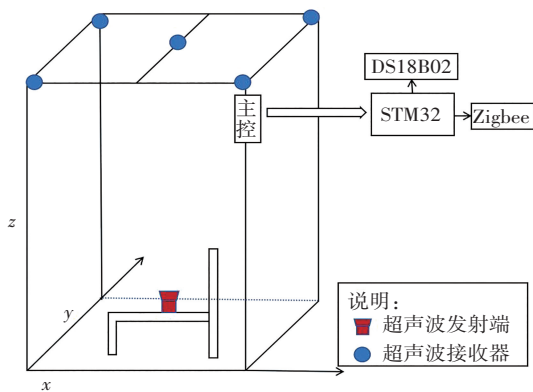


图 11 超声波室内定位系统图示

Fig. 11 Illustration of ultrasonic indoor positioning system

## 4.2 实验结果

由仿真实验可知:参考点数量为 4、6、8 个时,差分修正 Chan-Taylor 定位精度相差很小,在实际运用中,为减小定位操作复杂度,选用 4 个初始参考点。4 个参考点实际坐标与估计坐标如表 7 所示。

表 7 参考点测量坐标与误差

参考点实际坐标	测量坐标	误差
(30,30,10)	(26.6,33.7,14.3)	6.61
(25,25,30)	(23.4,27.3,32.1)	3.50
(35,20,5)	(32.3,16.2,8.7)	5.95
(15,30,0)	(16.9,26.1,2.5)	5.01

在图 11 的实验环境中,选择视距、非视距两种情况进行定位测量。视距定位测量 5 个点位,非视距定位测量 15 个点位,每个测量点进行 10 次定位获得平均值,得到改进后的差分修正 Chan-Taylor 算法和 Chan-Taylor 算法与测量点实际坐标的误差值如图 12 所示。

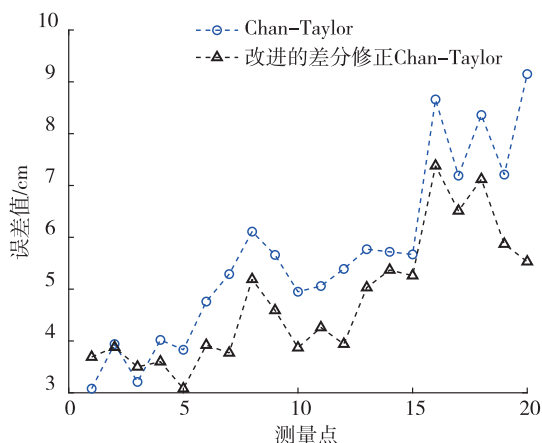


图 12 两种算法定位误差

Fig. 12 Two algorithms for positioning errors

图 12 中,前 5 个点为视距定位,待测点与较大误差参考点的相对距离较小,出现差分修正后的误差大于

修正前误差的情况。随着空间中新参考点的增加,有效误差修正信息权重增加,其他 4 个点的误差都有一定程度减小。改进差分修正后和 Chan-Taylor 算法的定位误差对比两个测量点的误差增大,偏差数值分别为 0.61 cm 和 0.29 cm,3 个测量点误差减小 1.53%~19.58%,平均误差值减少 0.07 cm。6 到 20 点为非视距定位,与 Chan-Taylor 算法相比,最大误差值由 9.15 cm 减小到 7.38 cm,定位误差范围缩小到 7.5 cm 以内。综合 2 种定位情况,90%的点定位误差在 6 cm 以下。

## 5 结论

通过对不同定位算法仿真实验可知:非视距定位环境中,不同参考点分布情况下,差分修正 Chan-Taylor 算法与传统定位算法相比,定位误差降低最少 6.43%,最高可达 37.46%。视距定位中采用改进差分修正 Chan-Taylor 算法与原算法相比,平均误差减少 11.15%~46.52%, $F_{RMSE}$  值降低 22.59%~45.07%。

经实验验证,该超声波室内定位系统视距定位中定位误差有少量降低,误差范围主要集中在 3~4 cm;非视距定位中定位误差越大,差分修正的效果越好,误差范围分布在 3~7.5 cm 之间,与 Chan-Taylor 算法相比,平均误差减少 22.49%,90%的误差值小于 6 cm,同比减小 28.23%。

该超声波室内定位系统在非视距定位中定位精度有明显提高,在视距定位中提升较小。后续可就定位算法和硬件系统两方面提高定位系统性能。定位算法方面:可优化参考点加权函数,选择相关性更强的参考点;差分修正 Chan-Taylor 算法与 Chan-Taylor 算法的定位误差呈正相关,可通过凸优化等方法提高 Chan-Taylor 算法的定位性能。硬件系统方面:优化超声波接收端信号识别方法,提高测距精度;增加超声波发射端信号范围,减少接收器布置数量,从而降低系统成本和设备复杂度。

## 参考文献(References):

- [1] 刘畅, 芮小博, 康金, 等. 超声波无线能量传输技术应用与研究进展[J]. 承德石油高等专科学校学报, 2021, 23(5): 70—75.  
LIU Chang, RUI Xiao-bo, KANG Jin, et al. Ultrasonic wireless power transmission technology [J]. Journal of Chengde Petroleum College, 2021, 23(5): 70—75.
- [2] 胡森康, 徐铮, 刘伟, 等. 一种精确的超声波定位系统[J]. 物理与工程, 2021, 31(1): 120—123.  
HU Sen-kang, XU Zheng, LIU Wei, et al. An accurate positioning system based on ultrasonic [J]. Physics and Engineering, 2021, 31(1): 120—123.
- [3] 沈明琪. 基于多超声波传感器的移动机器人目标定位新



- 方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- SHEN Ming-qi. Research on a new method of target positioning for mobile robot based on multiple ultrasonic sensors[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [4] AN Z, LIN Q, YANG L, et al. Revitalizing ultrasonic positioning systems for ultrasound-incapable smart devices[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2021, 20(5): 2007—2024.
- [5] 黄婷, 徐明. 基于超声波测距和多普勒测速的室内无人机跟踪定位算法[J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41(3): 105—108, 114.
- HUANG Ting, XU Ming. Tracking and localization algorithm of indoor UAV based on ultrasonic ranging and Doppler velocimetry[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2021, 41(3): 105—108, 114.
- [6] 马子耀, 程琳琳, 李月. 一种基于BP神经网络的RSSI与超声波的定位研究[J]. 计算机时代, 2021(11): 16—20.
- MA Zi-yao, CHENG Lin-lin, LI Yue. Research on RSSI and ultrasonic positioning based on BP neural network [J]. Computer Era, 2021(11): 16—20.
- [7] 周艳, 赵海, 张君, 等. 普适计算中的定位误差分析[J]. 电子学报, 2009, 37(2): 382—386.
- ZHOU Yan, ZHAO Hai, ZHANG Jun, et al. Location error analysis of pervasive computing[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(2): 382—386.
- [8] 燕学智, 王子婷, 王昕. 超声波三维定位系统中基线长度与误差传递关系的分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(4): 1461—1469.
- YAN Xue-zhi, WANG Zi-ting, WANG Xin. Analysis of relationship between baseline length and error transfer in ultrasonic 3D positioning system[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(4): 1461—1469.
- [9] LI B, DEMPSTER A G, RIZOS C, et al. A database method to mitigate the NLOS error in mobile phone positioning[C]//Proceedings of the IEEE/ION Position, Location, and Navigation Symposium. 2006: 173—178.
- [10] 方李林, 王建新, 张汉. 改进的Chan-Taylor加权室内定位算法研究[J]. 计算机与数字工程, 2022, 50(12): 2625—2629.
- FANG Li-lin, WANG Jian-xin, ZHANG Han. Research on improved Chan-Taylor weighted indoor location algorithm[J]. Computer & Digital Engineering, 2022, 50(12): 2625—2629.
- [11] 杨庆军. 基于波束赋形的TDOA和AOA定位技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- YANG Qing-jun. Research on TDOA and AOA positioning technology based on beamforming [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [12] PETUKHOV N, CHUGUNOV A, ZAMOLODCHIKOV V, et al. Synthesis and experimental accuracy assessment of Kalman filter algorithm for UWB ToA local positioning system [C]//Proceedings of the 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, 2021.
- [13] 刘忠志. 基于空间定位模型的三维室内定位系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- LIU Zhong-zhi. Design of three-dimensional indoor positioning system based on space positioning model [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [14] YAO S, MENG Q, ZHOU C, et al. The TDOA-based Kalman filter for trajectory tracking [C]//Proceedings of the IEEE 22nd International Conference on Communication Technology. 2022.
- [15] 程擎, 胡苗苗, 史晓红, 等. 改进的Taylor-Chan算法的多点定位精度研究[J]. 航空计算技术, 2021, 51(6): 1—3, 8.
- CHENG Qing, HU Miao-miao, SHI Xiao-hong, et al. Multi-point positioning accuracy based on improved Taylor-Chan algorithm[J]. Aeronautical Computing Technique, 2021, 51(6): 1—3, 8.
- [16] 魏佳琛. NLOS环境下基于最优化理论的TDOA定位算法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- WEI Jia-chen. NLOS position estimate algorithm based on optimization method in NLOS environment [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [17] 朱朱宁. 基于数字信号处理的超声波测距定位方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- ZHU Zhu-ning. Research on ultrasonic ranging and positioning method based on digital signal processing [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [18] 李鹏, 向宇翔, 荣冬成, 等. 改进的Chan-粒子滤波算法超宽带室内三维定位[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(4): 123—129.
- LI Peng, XIANG Yu-xiang, RONG Dong-cheng, et al. Improved Chan particle filter algorithm for UWB indoor 3D positioning[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(4): 123—129.
- [19] 谢地. 基于超声波的高精度室内定位系统研究与实现[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- XIE Di. Research and implementation of high precision indoor positioning system based on ultrasound [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [20] 王泽楠. 三维高精度室内定位方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- WANG Ze-nan. Research on 3D high precision indoor positioning method [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [21] 李帅. 微型超声波测温仪设计[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- LI Shuai. Design of micro ultrasonic guide temperature measurement [D]. Taiyuan: North University of China, 2018.

责任编辑:李翠薇