

基于 TDOA 的室内超声波定位方法的改进

王 凡, 彭 勇

(江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘 要: 基于超声波和射频信号的 TDOA (Time Difference Of Arrival, TDOA) 室内无线传感网定位系统得到了越来越普遍的研究。其以距离测量为基础计算待测节点坐标。测距的误差影响定位结果的准确性。因此, 文中主要目的是介绍基于超声波技术和射频技术定位系统的工作原理, 通过采用总体最小二乘法 (Total Least Square, TLS) 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 (Min-Max algorithm) 进行定位的位置坐标计算, 得到系统测距误差较小和定位准确性高的结果。实验数据仿真表明, 该方法提高了距离测量精度和系统的定位准确性。

关键词: 到达时间差; 室内定位; 超声波; 距离测量

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2014)06-0250-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2014.06.063

Improved Indoor Location Method for Ultrasonic System Based on TDOA

WANG Fan, PENG Yong

(College of Internet of Things, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The wireless sensor network positioning systems based on ultrasonic and RF of TDOA are widely being researched. It calculates blind node coordinates on the basis of distance measurement. Ranging errors affect the accuracy of positioning results. In this paper, the aim is to introduce the working principle of positioning system based on supersonic and radio technology, the linear fitting method of total least square is used for error compensation of distance measurement, which can obtain the distance correction values, and then the min-max algorithm is used to compute the location coordinates, acquiring the result with low measure error and high location accuracy. Experiment results show that this method makes the system achieve high precision of distance measurement and high positioning accuracy.

Key words: time difference of arrival; indoor location; ultrasonic; distance measurement

0 引 言

随着物联网、传感网等信息技术的发展, 相关应用对定位精度的要求也越来越高。例如地下车库、商场、移动机器人等室内定位均属于细粒度定位, 定位精度要求在厘米级^[1]。针对室内定位较高定位精度要求的特殊性, 目前室内定位多采用基于到达时间差的定位方法^[2-3]。TDOA 技术是根据两种不同传播速率的无线信号到达节点的时间差, 再根据传播速率计算距离的方法^[4-5]。超声波 (UltraSound, US) 信号和射频 (Radio Frequency, RF) 信号是现有 TDOA 技术通常采用的两种不同信号。其原理即

$$\frac{s}{v_{US}} - \frac{s}{v_{RF}} = \Delta t$$

其中, Δt 为两信号到达时间差; v_{RF} , v_{US} 分别为射频信号和超声波信号的传播速率。

射频信号的传播速率 $v_{RF} \approx 3 \times 10^8$ m/s, 因此

$$\lim_{v_{RF} \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{1}{v_{US}} - \frac{1}{v_{RF}}} = v_{US}$$

即 $s \approx \Delta t \times v_{US}$ 。

超声波因其指向性好, 易于实现等优点而被广泛使用于室内定位系统中^[6-7]。其测距原理为定位计算的基础。影响定位精度的因素有很多, 文中主要针对测距误差。文献[8]提出了距离信息选择算法以提高定位精度, 但是忽略了距离信息所携带的误差信息。文献[9-10]中采用的方法是对 TDOA 进行时间补偿

收稿日期: 2013-08-25

修回日期: 2013-11-28

网络出版时间: 2014-02-24

基金项目: 江苏省交通运输厅资助项目 (2012X08-2)

作者简介: 王 凡 (1989-), 女, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向为无线定位技术等; 彭 勇, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为计算机测控及智能化、嵌入式系统应用技术、无线传感网络应用技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140224.0916.043.html>

和系统修正,但是忽略了由信号传输引起的误差,从而导致不精确的距离信息。

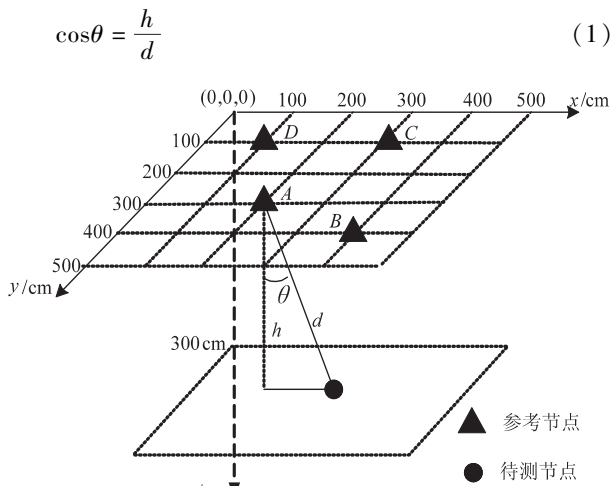
由超声波信号传输引起测距误差,从而影响定位精度。针对这一问题,文中首先采用总体最小二乘^[11]的直线拟合方法对测距进行误差补偿,修正测距,然后再采用极小极大算法^[12]进行定位计算,以提高系统的定位正确率。

1 系统布局

室内三维定位系统的传感器节点包括参考节点和待测节点。由于超声波的传播具有很强的方向性,且要保证待测节点至少收到三个不共线参考节点的超声波发射信号,因此要合理布局。根据室内三维空间的实际情况,已知参考节点分别被固定在天花板上的不同位置,待测节点安装在室内地面的移动目标上,移动目标可以随机移动。

为了保证移动目标的私密性、降低误差和计算量以及减少无线传输的次数,该定位系统在设计过程中将参考节点和待测节点均设有射频收发模块和超声波收发模块^[13]。当系统开始工作时,由待测节点发送射频信号通知参考节点启动定位,定位启动后就由参考节点周期性发送超声波信号进行距离测量。由于待测节点一次只能接收一个信号,因此随着定位次数的增加,计算量增大,从而导致误差增大,此时若检测到系统处于不良的定位状态,则系统定位终止,并由待测节点发送射频信号重新启动定位,以此循环,保证定位系统的性能和效率。

图 1 即为室内定位节点布局的三维坐标效果图。假设待测节点的坐标为 (x,y,z) , 参考节点的坐标为 $(x_1,y_1,z_1), (x_2,y_2,z_2), \cdots, (x_n,y_n,z_n)$ 。由于室内环境的特殊性可知 $z=300, z_1=z_2=\cdots=z_n=0$ 。参考节点与待测节点间距 d , 高度 h , 夹角 θ , 因此有



2 距离计算

2.1 误差分析与计算

从理论上分析,测距误差是不可避免的。根据超声波的传播特性,超声波在空气中的传播会随着距离的增大而衰减,且超声波的发射是呈圆锥状的,其发散角越大则偏离主心轴越远,同时,超声波的能量会随着发散角的增大而减少。

因此,待测节点与参考节点间的角度与距离存在一定的关系。不同的角度均会带来测距误差,从而影响定位准确性。

根据总体最小二乘方法的拟合原理,设测距误差为 y , 参考节点与待测节点间的角度 θ 为 x 。由实验测得的不同距离下测距误差与角度 θ 列出如表 1 所示的样本值,并假设样本坐标点 $(x_1',y_1'), (x_2',y_2'), \cdots, (x_n',y_n')$, 则有 (\bar{x},\bar{y}) :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i', \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i' \tag{2}$$

表 1 测距误差数据

	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
300 cm	1.5	2.0	2.6	3.4	5.0	6.8	7.9
350 cm	-0.5	-0.2	0	3.2	2.3	4.0	5.6
400 cm	0.2	0	1.0	2.3	3.2	5.3	7.3
450 cm	-1.6	-1.3	-1.0	0.6	1.4	3.4	5.5
500 cm	-1.4	-0.4	0	1.8	2.7	4.8	6.6
550 cm	-0.9	-0.1	0.8	1.4	2.6	5.3	8.1
600 cm	1.4	-1.0	-0.8	1.0	1.5	3.6	6.0
650 cm	-2.8	-1.9	-1.0	2.1	4.3	6.4	9.1
700 cm	-2.0	-0.7	1.2	2.6	3.7	5.0	7.1
750 cm	-1.8	-1.0	-0.6	1.3	2.4	4.0	6.7

拟合线性方程可以写为:

$$a(x - \bar{x}) + b(y - \bar{y}) = 0 \tag{3}$$

即

$$y = -\frac{a}{b}x + \frac{\bar{a}x + \bar{b}y}{b} \tag{4}$$

因此,只须求出其未知系数即可得到此线性拟合方程。在文献[14]中指出总体最小二乘拟合主要的依据原理是使各个已知数据点到直线方程 $a(x - \bar{x}) + b(y - \bar{y}) = 0$ 的距离平方和最小化,即

$$D(a,b,\bar{x},\bar{y}) = \sum_{i=1}^n \frac{[a(x_i - \bar{x}) + b(y_i - \bar{y})]^2}{a^2 + b^2} =$$
$$Mt = \begin{bmatrix} x_1 - \bar{x} & y_1 - \bar{y} \\ x_2 - \bar{x} & y_2 - \bar{y} \\ \vdots & \vdots \\ x_n - \bar{x} & y_n - \bar{y} \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$\text{其中, } \mathbf{M} = \begin{bmatrix} x_1 - \bar{x} & y_1 - \bar{y} \\ x_2 - \bar{x} & y_2 - \bar{y} \\ \vdots & \vdots \\ x_n - \bar{x} & y_n - \bar{y} \end{bmatrix}。$$

如表 1 所示,不同角度不同距离时的距离误差单位为 cm,同时角度的最大值为 60° 。根据图 1 得此系统最大坐标为(500,500),因此,系统测得最大距离为 750 cm。由 TLS 的拟合方法以及表 1 所示数据可得该误差补偿的线性方程为:

$$y = 0.13x - 1.7 \quad (6)$$

2.2 距离修正算法

在定位系统开始进行定位时,首先可以获得的参数为高度 h 和测得的距离 d ,那么在定位之初,需要通过数学计算得到 θ 的初始值,然后再经过误差补偿的线性方程得到补偿值,从而得到相对精度高的测量距离值,通过定位计算进一步得到待测节点的坐标值。距离修正的算法步骤如下:

$$(1) \cos\theta = \frac{h}{d} \rightarrow \theta = \arccos \frac{h}{d}$$

$$d_i \rightarrow \theta_i;$$

即由式(1)得到 θ 的计算方法并计算初始值;

$$(2) \theta_i \rightarrow y_{ic}$$

即通过式(6)得到误差的补偿值;

$$(3) (d_i - y_{ic}) \rightarrow d_i$$

即通过误差补偿达到距离修正。

3 定位计算

在定位过程中,获得相对距离信息之后,文中采用极小极大算法来确定待测节点的位置坐标。由于室内空间的特殊性,三维坐标中的 z 坐标都是已知的,可以暂时不考虑,因此在定位计算时只需计算出待测节点的 xy 坐标。

二维空间下极小极大算法的原理如图 2 所示,首先获得参考节点与待测节点距离信息 l ,然后参考节点以自身为中心, $2l$ 为边长作正方形,所有参考节点作出的正方形中重叠的四边形部分即为待测节点所在区域。其计算如式(7)所示。

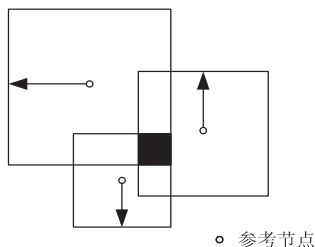


图 2 极小极大算法

$$(\max(x_i - l_i), \max(y_i - l_i)) \times (\min(x_i + l_i), \min(y_i + l_i)) \quad (7)$$

根据文中的系统节点布局图,在只考虑转换后的 xy 平面的二维情况时可得式(8)。

$$l_i = \sqrt{d_i^2 - h^2}, i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

然后,取四边形的中心点作为待测节点。中心点的坐标位置即为所求。假设四边形的中心点为 (x_0, y_0) , 则

$$\begin{cases} x_0 = \frac{[\min(x_i + l_i) - \max(x_i - l_i)]}{2} \\ y_0 = \frac{[\min(y_i + l_i) - \max(y_i - l_i)]}{2} \end{cases} \quad (9)$$

因此待测节点 (x, y, z) 的位置坐标为

$$\begin{cases} x = \frac{[\min(x_i + l_i) - \max(x_i - l_i)]}{2} \\ y = \frac{[\min(y_i + l_i) - \max(y_i - l_i)]}{2} \\ z = 300 \end{cases} \quad (10)$$

其中,坐标值单位为 cm。

如上分析,文中的定位计算只需将待测节点与参考节点间的距离和参考节点的已知坐标代入公式计算即可。该定位计算方法在合适的参考节点数目的情况下具有思想简单,计算方便,算法复杂度低的特点。其定位误差与参考节点数目的关系将在实验结果中给出。

4 实验结果及分析

实验过程中,实验场景为室内,温度为 28°C ,高度为 300 cm,系统布局框架如图 1 所示,参考节点在室内天花板上的布置按照栅格的布局,坐标均为已知。采集数据后主要是针对不同夹角下的测距精度的研究以及在不同参考节点数目的情况下对定位正确率的研究。

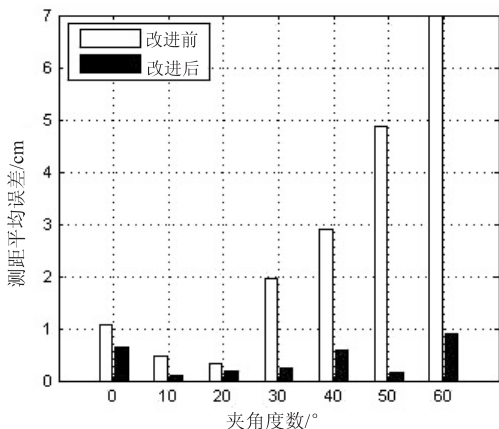


图 3 不同夹角下的测距平均误差对比图

图3所示即为在待测节点与参考节点之间的角度不同时,通过分别得到同一角度不同距离时的误差进行统计并取其平均值以正向幅度显示而得的仿真效果图。从图中可以看出,待测节点与参考节点间的夹角影响测距误差。经过补偿之后,此影响明显降低,从而降低了测距误差。

三边测量法^[11](Trilateration, Tri)是室内超声波定位的常用定位方法。由图4可以看出,Min-Max定位算法能够达到与三边测量法相当的定位正确率,且避免了三边测量法需要从众多测距值中随机选取三个的过程。但是,随着参考节点个数增多,Min-Max算法的计算量也越来越大。同时从图中可以看出,随着参考节点数目的增加,系统不断地请求定位,因而参与定位计算的参考节点增多,定位正确率呈上升趋势。但是由于过多的参考节点会导致时间延迟等,因而定位正确率又慢慢降低。

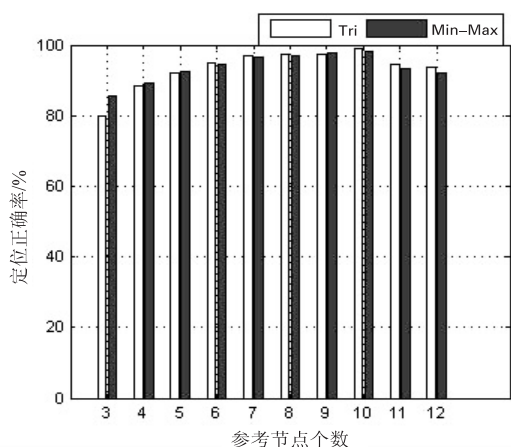


图4 Tri与Min-Max的定位正确率比较图

该定位系统为动态定位,待测节点随着目标的移动而移动,其移动速度必然会对定位结果造成影响。图5所示即为在一个待测节点的情况下,待测节点的移动速度对定位结果的影响。待测节点的移动速度越大,接收不到信号的概率越大,错误率也就相应越大,从而最终会导致系统无法正常工作。

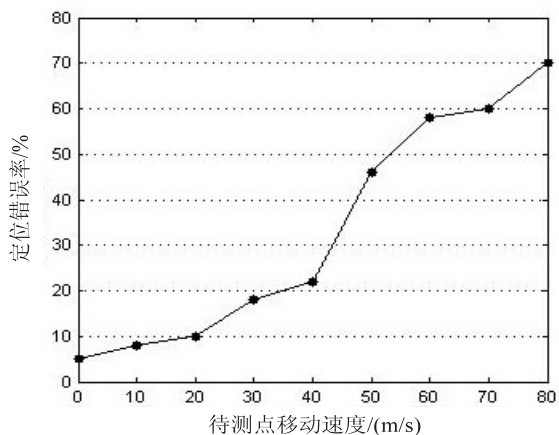


图5 待测节点移动速度对定位精度的影响


5 结束语

文中从超声波传输特性的角度,以总体最小二乘的直线拟合方法为基础,对距离计算进行修正,并采用极小极大算法计算待测节点位置坐标。该定位方法实现了对距离测量的修正,同时,在合适的参考节点的情况下,极小极大算法的应用为定位计算提供了简便的计算方法,避免了三边测量法需要从众多测距值中随机选取三个的过程。文中定位方法提高了测距精度和定位正确率,适用于基于超声波测距的无线传感网络,并具有一定的实际应用意义,满足了大多数室内定位需求。

参考文献:

- [1] 梁韵基,周兴社,於志文,等. 普适环境室内定位系统研究[J]. 计算机科学,2010,37(3):112-116.
- [2] 刘君,吴建国,褚曦丹,等. Cricket室内定位系统的研究与改进[J]. 计算机技术与发展,2011,21(5):206-209.
- [3] 樊晓翔,王福豹,严国强. 基于TDOA技术的自适应定位系统研究[J]. 计算机测量与控制,2009,17(4):727-731.
- [4] Wang Hongpeng, Han Gang. The research on responding time and precision of centralized controlled cricket indoor location system[C]//Proc of international conference on communications and mobile computing. Yunnan:IEEE,2009:349-352.
- [5] 邹杰,李珊君,陈晓明. 一种改进的室内无线定位算法[J]. 计算机工程,2011,37(14):76-78.
- [6] 张剑,王维,何俊峰,等. 基于双超声波模块的新型定位方法[J]. 传感器与微系统,2012,31(9):22-24.
- [7] Hazas M, Hopper A. Broadband ultrasonic location system for improved indoor positioning[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2006,5(5):536-547.
- [8] 刘玉宏,王耀宽. 一种无线传感器网络室内定位系统的改进方案[J]. 计算机工程与应用,2008,44(25):203-205.
- [9] 韩霜,罗海勇,陈颖,等. 基于TDOA的超声波室内定位系统的设计与实现[J]. 传感技术学报,2010,23(3):347-353.
- [10] 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.
- [11] Xu Peiliang, Liu Jingnan, Shi Chuang. Total least squares adjustment in partial errors-in-variables models algorithm[J]. Journal of Geodesy,2012,86(8):661-675.
- [12] Goldoni E, Savioli A, Risi M, et al. Experimental analysis of RSSI-based indoor localization with IEEE 802.15.4[C]//Proc of European wireless conference. Lucca:IEEE,2010:71-77.
- [13] 李娟,唐小超,葛立峰. 基于CC1101射频技术的室内超声波定位系统[J]. 自动化与仪表,2009,24(6):1-4.
- [14] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

基于TDOA的室内超声波定位方法的改进

作者: [王凡](#), [彭勇](#), [WANG Fan](#), [PENG Yong](#)
作者单位: [江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡, 214122](#)
刊名: [计算机技术与发展](#) 
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)
年, 卷(期): 2014(6)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjtz201406063.aspx