

# 一种新的超声波绝对定位方法

蒋林, 闫继宏, 臧希喆, 赵杰

(哈尔滨工业大学 机器人研究所, 哈尔滨 150001)

**摘要:**针对常规的超声波定位方法存在对决定定位精度的声速与渡越时间估算不准,导致定位精度有限的问题,提出了一种新的超声波绝对定位方法,即冗余超声波信息特殊融合法(SFMRUI)。SFMRUI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来修正误差。SFMRUI能很好地消除渡越时间误差,能求出波头滞后误差,并能对测量精度做出评价。实验与仿真结果证明SFMRUI法是正确的,且能大大提高绝对定位精度,与时差法和常规法相比优势很明显。

**关键词:**自动控制技术;超声波绝对定位;冗余超声波信息;渡越时间;波头滞后误差

**中图分类号:** TP29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2009)01-0188-06

## New method for ultrasonic absolute localization

JIANG Lin, YAN Ji-hong, ZANG Xi-zhe, ZHAO Jie

(Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract:** The precision of the traditional ultrasonic localization method is limited due to unsufficiently precise estimation of the sound velocity and the time of flight (TOF), therefore, a new method, the special fusion method for redundancy ultrasonic information (SFMRUI) was proposed to solve the precision problem. SFMRUI uses the geometric relationships among the redundant information and the implicit relationships between the redundant information and the error to correct the error. It is possible to eliminate the error of TOF, to calculate the wave lagging error and to estimate the measurement accuracy by SFMRUI. The experiments and simulations were performed and their results proved that the SFMRUI is correct and effective to improve the absolute localization accuracy. The proposed method is superior obviously to the traditional method and the time difference method.

**Key words:** automatic control technology; ultrasonic absolute localization; redundancy ultrasonic information; times of flight (TOF); wave lagging error

目前全球定位应用最广泛的是GPS,它的全球定位精度可达到米级,通过差分修正可以达到分米级,但相对局部定位来说这种精度还远远不够(尤其当要完成复杂的局部任务时),因此研究局部定位精确是很有必要的。移动机器人局部相对定位的传感器有很多种,如视觉、声纳、超声波、红外线、

罗盘等。但这些传感器大部分都不能应用于移动机器人局部绝对定位中,在移动机器人局部绝对定位中应用最多的是超声波传感器。超声波的反射方式应用于相对定位中,超声波的对射方式应用于绝对定位中。在绝对定位中一般将发射器固定在空间中,把接收器安装在移动物体上。

收稿日期:2007-03-30.

基金项目:“863”国家高技术研究发展计划项目(2006AA04Z245);长江学者和创新团队发展计划项目(IR T0423).

作者简介:蒋林(1976-),男,博士研究生.研究方向:机器人定位协作. E-mail:jlxyhjl@163.com

国内外有很多单位及个人在超声波绝对定位方面作了大量研究工作。周荣莲<sup>[1]</sup>对超声波测距误差产生的原因进行了详细的分析。胡跃辉等<sup>[2]</sup>提出了对测量结果进行加权算术平均处理的方法。杨亦春等<sup>[3]</sup>利用小孔径方阵进行了无源声探测定位的研究。华宏等<sup>[4]</sup>用超声波定位来确定物体的位置与方位。陈永光等<sup>[5]</sup>对无源时差定位原理与定位精度进行了研究。熊春山等<sup>[6]</sup>采用波头计数与零交叉点检测的方法来提高超声测距的精度。李光海等<sup>[7]</sup>将时频幅度分析方法与时差法引入声发射源定位技术中。中国香港的 F Tong 等<sup>[8]</sup>把超声波精确定位系统应用在自制导航车上,进行导航研究。美国学者 Ajay Mahajan<sup>[9]</sup>研究了三维位置传感系统。西班牙的 J M Mart ́n 等<sup>[10]</sup>首次将时差法运用到超声波定位中来,并进行了实验。但上述方法均无法完全消除波头滞后误差,且对定位精度无法做出一个很好的评价。为此,作者提出了一种新的超声波绝对定位方法,并进行了仿真实验研究。

### 1 超声波定位误差产生原因及估计

在实际定位中,无论是平面定位还是立体定位,它们的定位精度都受到环境温度、触发时间、硬件响应时间等的影响。实际测量中第  $n$  个接收器第  $i$  次测量距离  $L_{ni}$  的表达式为:

$$L_{ni} = v_i * t_{pni} \tag{1}$$

式中: $v_i$  为第  $i$  次测量时的声速; $t_{pni}$  为第  $n$  个接收器第  $i$  次渡越时间。

测量精度由渡越时间  $t_{pni}$  和声速  $v_i$  决定。 $v_i$  表示为

$$v_i = v_0 \sqrt{1 + \frac{t_i}{T_0}} \tag{2}$$

式中: $T_0 = 273.16$  ,  $v_0 = 331.45$  m/s。

一般在实用温度下( - 40 ~ 80 ) ,式(1)能让距离测量值达到  $\pm 0.5\%$  的精度<sup>[1]</sup>。

对于渡越时间  $t_{pni}$  ,由于在第  $i$  次测量中各个接收器波头滞后误差与硬件电路延迟比较一致,故用相同变量来表示,计算公式如下<sup>[6]</sup>

$$t_{pni} = t_c * t_{cni} + t_{di} - t_{di} \tag{3}$$

式中: $t_c$  为计数脉冲时间分辨率; $t_{cni}$  为第  $n$  个接收器第  $i$  次计数值; $t_{di}$  表示第  $i$  次测量中波头滞后误差; $t_{di}$  为硬件电路延迟,值小,需实验测定<sup>[6]</sup>。

发送器用 T40-16,频率为 40 kHz,每个波长的周期为 0.025 ms,距离 ( $t_i = 249$ ) 约为 0.8643

cm,实测中波头滞后误差应该为 0 ~ 4.3215 cm。电路延迟误差采用 DSP 处理,处理频率为 12 MHz,误差在  $\pm 10$  个芯片周期内,其距离误差约为  $\pm 0.028$  cm。综合上面两种误差可见以第一种误差为主。这种分析结果与参考文献[1]中的实验结果非常吻合。

### 2 现有超声波定位方法

#### 2.1 常规超声波定位方法存在的问题

一般的超声波定位法对影响定位精度的  $t_{pni}$  和  $v_i$  的处理方法是:对于声速  $v_i$  使用一个精确的温度传感器来测量环境温度,用式(2)来估算超声波的声速;对于渡越时间误差,或通过一些方法尽量减小这种误差或近似估计这种误差。比较典型的处理渡越时间误差的方法如下:采用让信号进入控制芯片前进行 AGC 放大来减少触发误差<sup>[1]</sup>,并随测量距离不同而调整阈值;采用实验来标定误差值<sup>[2]</sup>;采用数学方法来拟合测量值与真实值之间关系<sup>[1]</sup>;采用多次测量取平均值来剔除单次测量误差<sup>[2]</sup>。上述方法中,通常是把这个误差作为一个常数  $q$  进行标定,并应用到各次测量中。通过分析超声波产生误差的原因可见,在各次测量中渡越时间误差会在一个小范围内波动,易知用一个常数来修正误差其精度自然有限。

常规定位法中实测值、修正值与真实值间的关系如图 1 所示。令  $T_i(x_i, y_i)$  表示第  $i$  次定位的实际值; $T_{1i}(x_{1i}, y_{1i})$  表示第  $i$  次测量后的修正值; $T_{0i}(x_{0i}, y_{0i})$  表示第  $i$  次测量值。常规法的表达式见式(4)。

$$\begin{cases} (x_{1i} + a)^2 + y_{1i}^2 = (L_{1i} - q)^2 \\ (x_{1i} - a)^2 + y_{1i}^2 = (L_{2i} - q)^2 \\ \sqrt{x^2 + y^2} = L \end{cases} \tag{4}$$

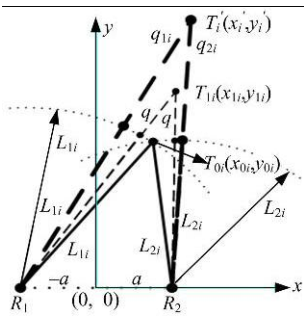


图 1 常规定位法误差图

Fig. 1 Error of traditional localization method

2.2 时差法及存在的问题

时差法<sup>[7]</sup>起源于无源探测技术<sup>[3]</sup>,应用于被动定位中。可探测范围大,测量精度受时差精度及时差大小影响,当声源处于两传感器连线中垂线附近时,测量结果误差大<sup>[3]</sup>。目前国内还没有将时差法应用到超声波定位中的,西班牙的 J M Mart ́n 等<sup>[7]</sup>首次将时差法应用到超声波定位中,当各个接收器波头滞后一致时测量精度很高,当各个接收器波头滞后不一致时测量精度很低,同时自身无法评价单次定位的精确度。时差法如图 2 所示,方程见式(5)。

$$\begin{cases} \sqrt{(x+a)^2+y^2}-\sqrt{x^2+y^2}=v_i\cdot t_{12}=L_{1i}-L_{2i} \\ \sqrt{(x-a)^2+y^2}-\sqrt{x^2+y^2}=v_i\cdot t_{32}=L_{3i}-L_{2i} \end{cases}$$

(5)

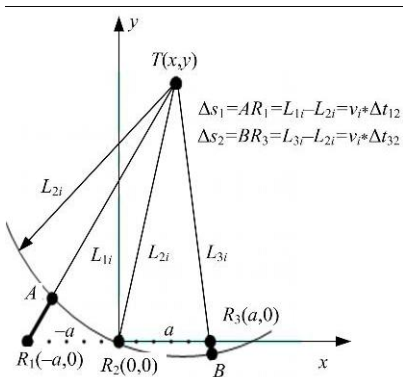


图 2 时差法定位原理图  
Fig. 2 Schematic diagram of time-difference localization method

3 冗余超声波信息特殊融合法

在上述研究分析的基础上,提出了冗余超声波信息特殊融合法(SFMRUI)。它的总体思想就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、误差修正,达到提高精度的目的。

3.1 冗余超声波信息特殊融合法原理

SFMRUI 法就是应用多余的超声波传感器接收信息并按其误差的特有规律进行相应修正融合,从而提高绝对定位精度。通常平面定位用 2 个超声波接收装置,三维定位用 3 个超声波接收装置,而 SFMRUI 法平面需用 3 个或 3 个以上超声波接收装置,三维用 4 个或 4 个以上超声波接收装置。

在这里仅研究平面绝对定位的问题。在平面定位中也仅研究用一个多余的接收信息来修正超

声波渡越误差的情况,其他情况的研究思想与此类似,即多一个冗余信息就可以多修正一个误差。超声波渡越距离误差记为  $q_i$

$$q_i = (t_{qi} + t_{di}) \cdot v_i$$

(6)

式中: $q_i$  表示第  $i$  次测量距离误差。

3.2 平面融合一位冗余信息定位法(FSRI)

在平面定位中用 3 个超声波接收器就多出了一个量。各点坐标为  $R_1(-a, 0)$ ,  $R_2(0, 0)$ ,  $R_3(a, 0)$ , 因为测量有误差,由  $R_1$  与  $R_2$  算出发射点为  $T'''_i$ , 由  $R_1$  与  $R_3$  算出发射点为  $T_i$ , 由  $R_2$  与  $R_3$  算出发射点为  $T_i$ , 各个量间的关系如图 3 所示。图 3 中由于测量值  $L_{1i}$ 、 $L_{2i}$ 、 $L_{3i}$  与真实值之间有误差,故由它们产生的 3 个交点是不准确的,也很难判定哪个点更好。但基于前文的分析可见,在单次测距中测量值  $L_{1i}$ 、 $L_{2i}$ 、 $L_{3i}$  与真实值间相差为  $q_i$ , 各个测量距离加上  $q_i$  后应该刚好相交于点  $T_i(x_{0i}, y_{0i})$ , 理论上  $T_i(x_{0i}, y_{0i})$  就是  $T_i(x_i, y_i)$ , 即第  $i$  次定位真值,这也就融合了一位冗余信息,修正了渡越误差,如图 4 所示。 $L_{1i}$ 、 $L_{2i}$ 、 $L_{3i}$  与  $v_i$  的关系见式(7)。由图 4 中的几何关系与式(7)可以得到式(8)。

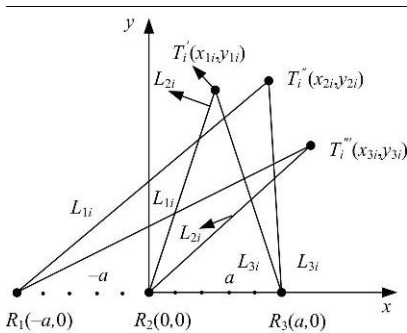


图 3 一位冗余信息定位发散图  
Fig. 3 Dispersion of single redundancy information

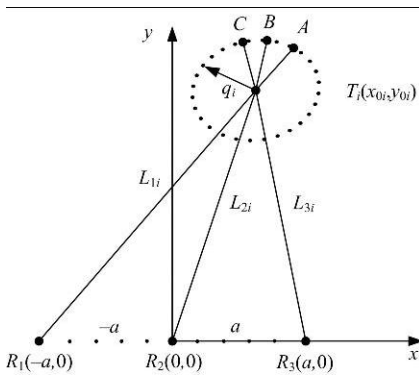


图 4 融合一位冗余信息定位图  
Fig. 4 Fusion of single redundancy information

$$\begin{cases} L_{1i} = t_c * t_{c1i} * v_i \\ L_{2i} = t_c * t_{c2i} * v_i \\ L_{3i} = t_c * t_{c3i} * v_i \end{cases} \quad (7)$$
$$\begin{cases} (a + x_{0i})^2 + y_{0i}^2 = (t_c * t_{c1i} * v_i - q_i)^2 \\ x_{0i}^2 + y_{0i}^2 = (t_c * t_{c2i} * v_i - q_i)^2 \\ (a - x_{0i})^2 + y_{0i}^2 = (t_c * t_{c3i} * v_i - q_i)^2 \\ \sqrt{x_{0i}^2 + y_{0i}^2} = L \end{cases} \quad (8)$$

解式(8)可以得到多组解,由  $y_{0i}$ 、 $L$  取正值舍去几组解后只剩下一组解。当各个接收器波头滞后误差一致时,计算出的  $q_i$  刚好为整体波头滞后误差,这时波头滞后误差刚好被消除。由实验可知,当各个接收器渡越误差中波头误差一致时,  $q_i$  (0~4.35) cm,当各个接收器渡越误差中波头误差 不一致时,  $q_i$  会远远超出这个范围。因波头误差间相差为波头的整数倍,为不连续值,故  $q_i$  也不连续,要么  $q_i$  (0~4.35) cm,要么远远超出这个范围。故  $q_i$  (0~4.35) cm 与否成为衡量第  $i$  次测量中波头误差是否一致的标准,当第  $i$  次测量中波头误差 不一致时,应按其内部规律修正到一致,再统一消除这个误差。波头滞后误差的规律是,接收器离发射器越远,波头触发时间滞后越厉害,这给修正指明了方向。当  $q_i$  / (0~4.35) cm 时,先排列出  $L_{1i}$ 、 $L_{2i}$ 、 $L_{3i}$  的大小顺序,

因为波头的误差不会影响  $L_{1i}$ 、 $L_{2i}$ 、 $L_{3i}$  的大小顺序,按  $L_{1i}$ 、 $L_{2i}$ 、 $L_{3i}$  中较大项减波头的整数倍值,较小项加波头的整数倍值,加减的倍数小于等于 2,对这些情况进行排列组合,每种情况修正一次,运算一次,得到一个新的  $q_i$ ,并判断此时  $q_i$  (0~4.35) cm 是否成立,直到  $q_i$  (0~4.35) cm 则停止,当所有情况都遍历完了还是无法使  $q_i$  (0~4.35) cm,则说明第  $i$  次测量数据有问题,应舍弃。

3.3 FSRI 测量实验

建立实验系统对 SFMRUI 法中的 FSRI 进行实验。在  $t_i = 24$  、无风的环境下,取  $a = 25$  cm,建立实验系统,实验系统原理图见图 5。对实验系统进行标定后的表示方程见式(9)。

$$\begin{cases} (25.6 + x)^2 + y^2 = (t_c * t_{c1i} * v_i - q_i)^2 \\ x^2 + y^2 = (t_c * t_{c2i} * v_i - q_i)^2 \\ (x - 23.75)^2 + y^2 = (t_c * t_{c3i} * v_i - q_i)^2 \\ \sqrt{x^2 + y^2} = L \end{cases} \quad (9)$$

在采集相同的实验数据后,FSRI 法、常规法与时差法分别按自己的算法进行数据处理,处理后的结果见表 1。表 1 中前两组为各个接收器波头延迟比较一致的情况,后两组为各个接收器波头延迟不一致的情况。

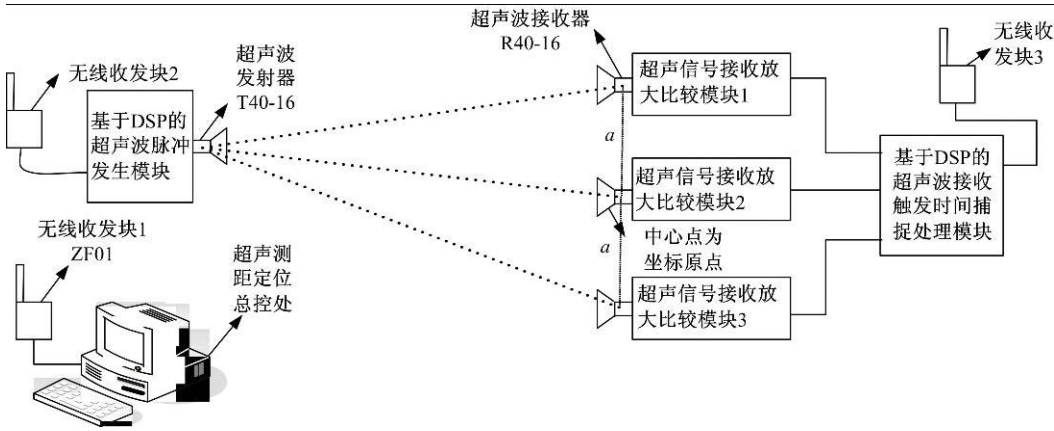


图 5 FSRI 实验系统原理图

Fig.5 Experimental system of FSRI

由表 1 可见: 常规法的测量精度受整体误差的影响很大,整体误差变大其测量误差也变大; 各个接收器波头延迟误差的一致性对时差法的测量精度有很大的影响:各个接收器波头延迟误差一致时,时差法的测量精度与 FSRI 法相同,当延迟误差 不一致时,时差法的测量精度很低;

FSRI 法的测量精度比较稳定,测量精度很高,而且 FSRI 法可以通过  $q_i$  对误差进行评价,且整体误差的变化对其无影响。其实 FSRI 法的各个方程中消去  $q_i$  即为时差法的方程,由于时差法中无  $q_i$ ,故无法对测量精度进行自我评价,难以找到误差修正方向。





## 5 结束语

分析了超声波绝对定位中误差产生的原因并进行了误差估计。指出了常规定位法与时差法的不足之处,提出 SFMRUI 法并对其中的 FSRI 法进行了详细的理论分析。通过对 SFMRUI 中的 FSRI 法进行实验,证明 FSRI 是正确的,提高了超声绝对定位测量精度。与常规法和时差法进行了比较,相对这两个方法 FSRI 法的优势很明显。通过仿真实验证实 FSRI 法能大大提高超声波绝对定位精度。重点论述 FSRI 法中变量  $q_i$  可以作为衡量一组数据好坏的标准,以及给定位误差修正指明了方向,并可以计算出误差大小,这是其他方法所达不到的。进一步研究将尝试把 SFMRUI 中的 FSRI 法应用到实验室的全方位移动机器人的精确定位与导航中。

### 参考文献:

- [1] 周荣莲. 基于微机的超声波跟踪定位系统的设计与实现[J]. 微计算机信息, 2004, 20(10): 47-49.  
Zhou Rong-lian. The design and implement of super-sonic track system on microcomputer[J]. Control and Automation, 2004, 20(10): 47-49.
- [2] 胡跃辉, 周康源, 周平, 等. 一种实时 3D 超声定位系统的设计[J]. 声学技术, 2004, 23(1): 29-32.  
Hu Yue-hui, Zhou Kang-yuan, Zhou Ping, et al. Design of a high accuracy real-time 3D ultrasonic location system[J]. Technical Acoustics, 2004, 23(1): 29-32.
- [3] 杨亦春, 滕鹏晓, 李晓东, 等. 小孔径方阵对大气中运动声源的定位研究[J]. 声学学报, 2004, 29(4): 346-352.  
Yang Yi-chun, Teng Peng-xiao, Li Xiao-dong, et al. Study of acoustic position for moving sources in low sky with a small spatial array[J]. Acta Acustica, 2004, 29(4): 346-352.
- [4] 华宏, 王涌天, 郭向前. 超声波六自由度跟踪器设计原理及误差模型研究[J]. 自动化学报, 2000, 26(6): 840-844.  
Hua Hong, Wang Yong-tian, Guo Xiang-qian. Design principle and error analysis of 6 DOF ultrasonic position and orientation tracker[J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(6): 840-844.
- [5] 陈永光, 李昌锦, 李修和. 三站时差定位的精度分析与推算模型[J]. 电子学报, 2004, 32(9): 1452-1455.  
Chen Yong-guang, Li Chang-jin, Li Xiur-he. A precision analyzing and reckoning model in tri-station TDOA location[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(9): 1452-1455.
- [6] 熊春山, 彭刚, 黄心汉, 等. 基于超声测距的三维精确定位系统与设计[J]. 自动化仪表, 2001, 22(3): 7-10.  
Xiong Chun-shan, Peng Gang, Huang Xin-han, et al. The design of 3-D precise positioning system based on ultrasonic distance measurement[J]. Process Automation Instrumentation, 2001, 22(3): 7-10.
- [7] 李光海, 刘时风. 基于小波分析的声发射源定位技术[J]. 机械工程学报, 2004, 40(7): 136-140.  
Li Guang-hai, Liu Shi-feng. Technique of acoustic emission source locating based on wavelet analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(7): 136-140.
- [8] Tong F, Tso S K, Xu T Z. A high precision ultrasonic docking system used for automatic guided vehicle[J]. Sensors and Actuators A, 2005, 118: 183-189.
- [9] Mahajan Ajay, Figueroa Fernando. An automatic self-installation and calibration method for a 3D position sensing system using ultrasonics[J]. Robotics and Autonomous Systems, 1999, 28: 281-294.
- [10] Mart í n J M, Jim é nez A R, Seco F. Estimating the 3D-position from time delay data of US-waves: experimental analysis and a new processing algorithm[J]. Sensors and Actuators A, 2003, 101: 311-321.