

基于冗余超声波信息融合的绝对定位研究

蒋 林 闫继宏 朱延河 赵 杰

(哈尔滨工业大学 机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 针对现有超声波绝对定位方法不足及超声波传播的特点, 提出了冗余超声波信息融合法(FMRUI). 针对FMRUI中各个接收器波头延迟误差一致与不一致的情况分别提出了不同的误差修正策略, 当各个接收器误差一致时通过一个统一的变量消除掉, 当误差不一致时先修正到一致再统一消掉. FMRUI能很好地消除渡越时间误差, 并能评价测量精度的高低. 搭建了实验系统并用全方位移动机器人做了实验, 实验结果证明FMRUI法是正确的, 绝对定位精度有明显提高.

关键词: 移动机器人; 绝对定位; 超声波信息融合法; 误差修正策略; 波头延迟误差; 渡越时间误差
中图分类号: TP29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4512(2008)05-0063-04

Absolute positioning using redundant ultrasonic information fusion

Jiang Lin Yan Jihong Zhu Yanhe Zhao Jie

(Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Aiming at weakness of the existing ultrasonic absolute positioning method and the ultrasonic propagation characteristic, the fusion method for redundancy ultrasonic information (FMRUI) is proposed. For different wave lagging errors, different strategies were used to revise the error. When the error of the receivers is identical, a variable was used to revise the error. Otherwise something must firstly be done to make the error to be identical. FMRUI can well eliminate the error about times of flight (TOF), moreover, it can give an estimation of the measurement accuracy. Finally, an experiment system is developed and the experiment results show that the FMRUI is effective and the positioning accuracy of 0.5cm is obtained.

Key words: mobile robot; absolute positioning; ultrasonic information fusion; error revising strategies; wave lagging error; error about TOF

移动机器人局部相对定位的传感器有很多, 如视觉、声纳、超声波、红外线、罗盘等, 这些传感器中仅超声波传感器应用于绝对定位中. 超声波的脉冲回波方法应用于相对定位中, 超声波的波对射方式应用于绝对定位中. 绝对定位时, 一般将接收器固定在空间, 把超声波发射器安装在移动物体上, 反之亦然. 国内外有很多研究者在超声波绝对定位与提高绝对定位精度方面作了大量工作. 文献[1~5]进行了超声波常规定位方法提高

定位精度的研究, 采用了模拟法、加权法、零交叉点检测法等. 文献[6, 7]应用时差法进行超声波绝对定位的研究. 文献[2, 7, 8, 9, 10]将超声波绝对定位应用到移动物体与移动机器人的定位与导航中. 不过上述定位方法无法完全消除波头滞后误差^[2]的影响, 定位精度有限或自身无法评价单次定位的准确度, 本文提出的冗余超声波信息融合法(FMRUI)恰好能解决这些问题.

收稿日期: 2007-09-03.

作者简介: 蒋 林(1976-), 男, 博士研究生, 哈尔滨, 哈尔滨工业大学机器人研究所(150080).

E-mail: jlxyl@163.com

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2006AA04Z245); 长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0423).

转载

1 冗余超声波信息融合法

1.1 超声波定位特点及误差

无论在平面中还是立体中定位,定位精度都受环境温度、硬件响应时间等因素影响.实际测量中第 n 个接收器第 i 次测量距离 $L_{ni} = v_i t_{pni}$,式中:声速 $\{v_i\}_{\text{m/s}} = 331.45 \sqrt{1 + \{t_i\} / 273.16}$, t_i 为测量时环境温度值; $t_{pni} = t_c t_{cni} - t_{qni} - t_{di}$ 为第 n 个接收器第 i 次测量的渡越时间^[3], 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} 为硬件电路延迟^[6],需实验测定; t_{qni} 表示第 n 个接收器第 i 次测量波头滞后误差, $t_{qni} = N_{ni} / f$, f 为超声波频率, N_{ni} ($0 \sim 5$) 为滞后的波头数.测量精度由 t_{pni} 和 v_i 决定.

因各个接收器共用一块处理芯片,故各个接收器硬件电路延迟比较一致,用统一的变量 t_{di} 表示.用 t_{ni} 表示第 n 个接收器第 i 次测量中的总误差, t_{ni} 与 t_{qni} 和 t_{di} 的关系为 $t_{ni} = t_{qni} + t_{di}$. 综合得到第 i 次测量中 3 个接收器(平面定位)总误差表达式为: $t_{1i} = N_{1i} / f + t_{di}$; $t_{2i} = N_{2i} / f + t_{di}$; $t_{3i} = N_{3i} / f + t_{di}$. 可见各个接收器的总误差或一致,或相差波长的整数倍.

1.2 FMRUI 原理

FMRUI 法的整体思想就是利用冗余信息间的特有几何关系,以及冗余信息与误差间的隐含关系,进行误差评估和修正,达到提高精度的目的. FMRUI 针对超声波接收器波头误差的情况进行分类:第一类的波头误差一致;第二类的波头误差不一致.对两类情况分别采用不同的误差修正策略.

通常平面定位用两个超声波接收器,三维定位用 3 个超声波接收器. FMRUI 平面需要至少用一个接收器.运用 FMRUI,无论平面定位还是三维定位,单冗余信息融合(FSRI)能修正超声波渡越时间误差,双冗余信息融合能修正超声波渡越时间误差与声速误差.三维定位与平面定位类似,只是相应多出一个接收器来确定发射器的空间高度,这里仅研究平面定位的情况.

1.3 单冗余信息融合定位法(FSRI)

在平面定位中,发射器与接收器等高.用一个超声波发射器固定在移动物体上,坐标为 $T_i(x_{0i}, y_{0i})$, 3 个固定的超声波接收器坐标分别为 $R_1(-a_1, 0)$, $R_2(0, 0)$ 和 $R_3(a_3, 0)$. 理想情况下发射器与接收器间几何关系见图 1(a). 因为有渡越时间误差,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 ,如图 1(b) 所示.这 3 个点一般是不重合的,且都是不准确的,很难判定哪个点更接近真实值.由前面的分析可知,在第 i 次测量中,各个接收器的总误差或一致或相差波长的整数倍.对此,本文分别使用不同的误差修正策略.

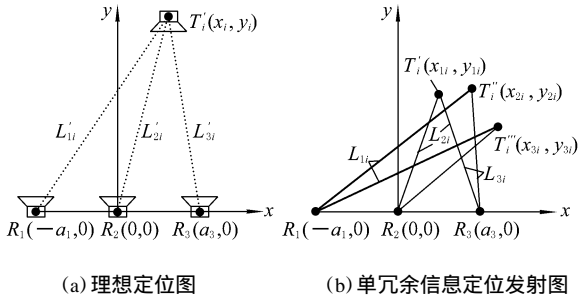


图 1 理想情况下的发射与接收

若波头误差一致,则在第 i 次测量中,各接收器的总误差一致,即 $t_{1i} = t_{2i} = t_{3i}$,记这时的误差为 $q_i = t_{1i} v_i = t_{2i} v_i = t_{3i} v_i$. 3 个接收器的测量值为: $L_{1i} = t_c t_{c1i} v_i$; $L_{2i} = t_c t_{c2i} v_i$; $L_{3i} = t_c t_{c3i} v_i$. 把 3 个接收器的测量值减去 q_i 后得到各个发射器与接收器的真实距离,它们应该刚好相交于发射点 $T_i(x_{0i}, y_{0i})$,它们间的几何关系见图 2,表达式为:

$$\begin{cases} (a_1 + x_{0i})^2 + y_{0i}^2 = (L_{1i} - q_i)^2; \\ x_{0i}^2 + y_{0i}^2 = (L_{2i} - q_i)^2; \\ (a_3 - x_{0i})^2 + y_{0i}^2 = (L_{3i} - q_i)^2; \\ \sqrt{x_{0i}^2 + y_{0i}^2} = L. \end{cases} \quad (1)$$

解方程(1),由 y_{0i} 取正值舍去一组解,在剩下的一组解中得到 q_i 的值. q_i 应该刚好为渡越时间误差,故 q_i 应该满足 $q_i = (0 \sim 5 \lambda_i)$, λ_i 为第 i 次测量时的超声波波长.

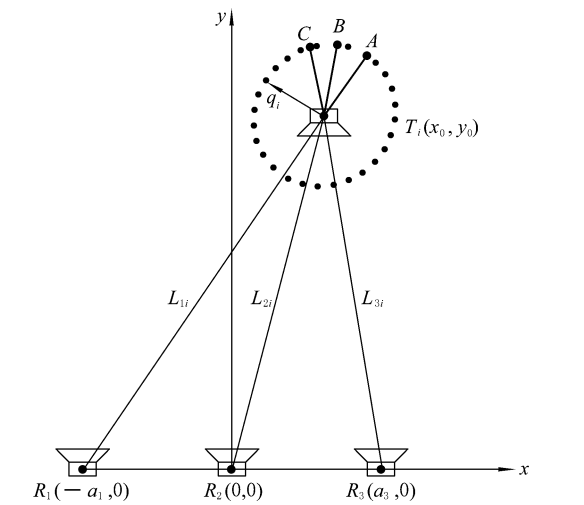


图 2 单冗余信息融合定位图

若波头误差不一致,则在第 i 次测量中,各个接收器的总误差相差波长整数倍,用同一个变量 q_i 去修正各个接收器的误差,代入方程(1),得到

的 q_i 会满足 $q_i \notin (0 \sim 5 \text{ m})$ 且远远偏离这个范围. 这时解得的 x_{0i} , y_{0i} 和 L 都是不准确的, 需要把各个接收器测量误差的不一致消除掉, 让它们重新达到一致, 再用统一变量 q_i 把它消除掉. 由于超声波传播距离越远能量下降越多, 因此测量值大的接收器波头滞后大, 这给消除各个接收器误差的不一致指明了方向. 当 $q_i \in (0 \sim 5 \text{ m})$ 时, 按 L_{1i} , L_{2i} 和 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 $q_i \in (0 \sim 5 \text{ m})$ 是否成立, 直到 $q_i \in (0 \sim 5 \text{ m})$ 时停止; 当所有情况都遍历完了还是无法使 $q_i \in (0 \sim 5 \text{ m})$ 时, 则说明第 i 次测量数据有误, 舍弃.

1.4 双冗余信息融合定位法

用 4 个接收器进行平面定位, 就有 2 个渡越时间冗余, 用这 2 个量可以确定渡越时间误差 t_i 及声速 v_i . 4 个接收器坐标为 $R_1(-a_1, 0)$, $R_2(-a_2, 0)$, $R_3(a_3, 0)$ 和 $R_4(a_4, 0)$. 在第 i 次测量中, 超声波发送点的坐标为 $T_i(x_{0i}, y_{0i})$, 4 个接收点的测量时间为 t_{c1i} , t_{c2i} , t_{c3i} 和 t_{c4i} , 它们的关系如图 3 所示. 由图 3 中的几何关系得

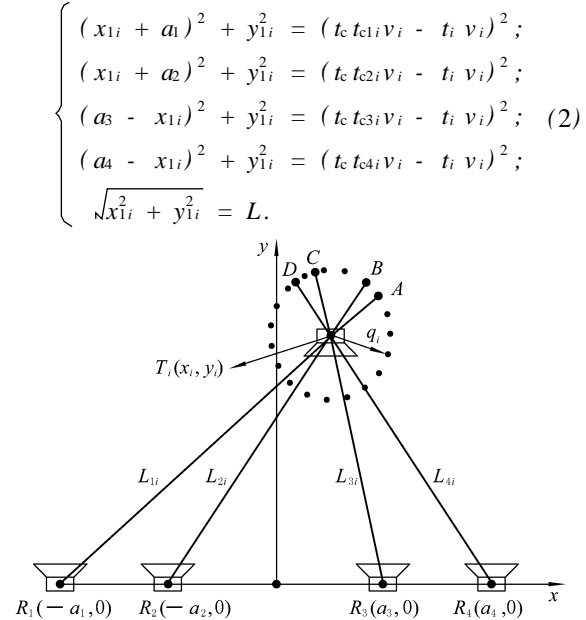


图 3 双冗余信息融合定位图

由于 y_{1i} 与 v_i 恒正, 可去掉式 (2) 的多组解. 可通过 v_i 取值范围来判断这组数据是否有效,

$$v_i = (0.995 \times 331.45 [(t_i + 273.16)/273.16]^{1/2} \text{ m}; 1.005 \times 331.45 [(t_i + 273.16)/273.16]^{1/2} \text{ m}). \quad (3)$$

当 v_i 满足式 (3) 时, 说明这组数很精确; 当 v_i 不满足式 (3) 时, 说明这组数需要再次修正. 同时也可

以根据 $t_i \in (0 \sim 5/f)$ 以及各个接收器波头误差的两种情况, 分别采用不同的策略来修正误差, 过程与 FSRI 同.

2 超声波 FSRI 实验

超声波 FSRI 实验系统见图 4. 这里仅对平面

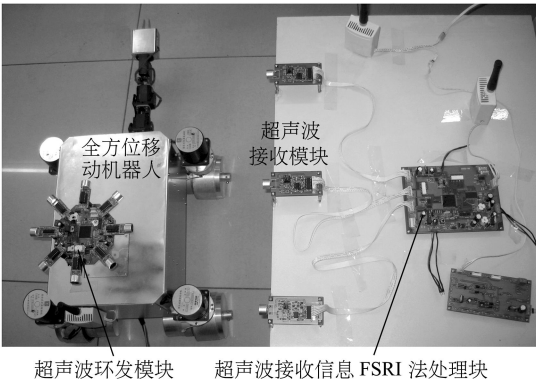


图 4 FSRI 实验系统

单冗余信息融合法进行验证, 其余情况与此类似. 在这个实验系统中, 一个超声波环发模块固定在全方位移动机器人上, 8 个发射器覆盖周围 360° 的范围, 每次仅让对着 3 个接收器的那个发射器发射超声波, 每次直接测得的值为发射器中心点的空间坐标, 要得到超声波环发模块中心点的坐标值经过几何换算即可. 3 个超声波接收器固定在桌面上, 发射器与接收器等高. 发射器为 T40-16, 发射频率为 40 kHz, 每次发送 5 个波, 间隔至少 25 ms. 3 个接收器均为 R40-16. 在发射器、超声信息 FSRI 处理模块及 PC 机之间, 通过无线通信模块 ZF01 进行通信. 需要测距时, 由上位机发送测距命令, 发射器与超声信息 FSRI 处理模块同时接到测距命令, 发射器发送 5 个波, 超声信息 FSRI 处理模块开始计时, 3 路共用一个计时时钟, 每个捕获引脚捕获到上升沿后就停止计时, 并停止该路捕获, 直到 3 个捕获引脚都捕获到信息. 采集此时的环境温度, 结合刚得到的 3 个测量值, 按 FSRI 法进行绝对定位解算.

3 FSRI 绝对定位实验

在 $t_i = 22.9$ 无风的环境下, $v_i = 345.0638 \text{ m/s}$, $t_c = 0.33 \mu\text{s}$, $r_i = 8.627 \text{ mm}$, 对实验系统进行标定后得 $a_1 = 0.40835 \text{ m}$, $a_1 = 0.39437 \text{ m}$. 在此实验中让全方位移动机器人沿一条直线运动, 在运动过程中进行一系列的定位实验, 实验结果见图 5.

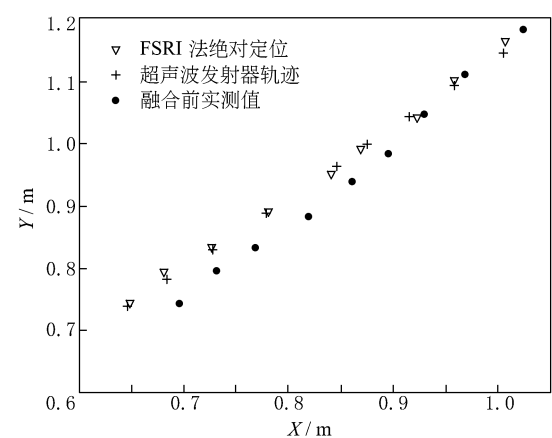


图 5 FSRI 定位实验

从图 5 可见,FSRI 对误差的修正效果很好,图中也有少许位置误差修正不很理想,可能与当时空气中存在扰动有关.总的来看 FSRI 使全方位移动机器人定位精度提高不少.

下一步的工作是将 FMRUI 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] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] Tong Chiachang, Figueroa J F. A method for short or long range time-of-flight measurements using phase-detection with an analog circuit [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(5): 1 324-1 328.

[6] 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): 1 452-1 455.

[7] Martin J M, Jiménez A R, Seco F, et al. Estimating the 3D-position from time delay data of US-waves: experimental analysis and a new processing algorithm [J]. Sensors and Actuators, 2003, A101: 311-321.

[8] 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.

[9] Tong F, Tso S k, Xu T Z. A high precision ultrasonic docking system used for automatic guided vehicle [J]. Sensors and Actuators, 2005, A118: 183-189.

[10] Mahajan A, Figueroa F. An automatic self-installation and calibration method for a 3D position sensing system using ultrasonics[J]. Robotics and Autonomous Systems, 1999, 28: 281-294.

中法联合实验室建设进入新阶段

3月18日,由我校生命学院中法联合实验室培养的两名博士生黄思罗、涂海军顺利通过了博士论文答辩.

这两名博士生从生命学院刘剑峰教授,是生命学院中法联合实验室首届博士毕业生.此次答辩得到了校方和法方的高度重视,法国驻汉总领事费勇和科技参赞傅雷参与了本次答辩.

费勇在致辞中祝贺两位博士顺利毕业,表示这是中法联合实验室科技合作与交流的一个新的开始,并表示将尽全力支持、促进法方和华中大今后在各领域的合作.副校长刘伟和外事处负责人接待了费勇一行.刘伟表示,我校将在生物学领域与法方开展更为紧密的合作.

据了解,我校中法联合实验室的合作目标是建立药物的筛选依据平台,利用该模型的高通量筛选技术从中国的自然草药中进行筛选.自2004年以来,联合实验室获得 CNRS(法国国家科研中心)的经费支持,目前已发表论文有 3 篇被 SCI 收录.