基于超声波的移动机器人多目标探测定位方法

王国富 高 峰 杨新红 崔 莹

(北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为了使移动机器人能够对离散的多个目标进行准确的探测定位,提出了一种新的超声波智能探测方法. 采用 3 个收发一体的超声换能器阵列发送近似的平面声波波束,并建立空间坐标系. 3 个探头定时发送超声波脉冲,同时数字信号处理器采集并分析接收到的回波信号,在给定的算法下滤除杂波、识别提取回波首波、二次回波和三次回波等特征信号数据,在正确检测出各路波束的回波时间后,通过计算给出多个被测物体的准确定位. 实验采用了杆件物体作为被测对象,对回波信号进行高速数据采集处理后计算出被测目标的坐标值,比较了计算物位与实测物位数据,结果验证了该方法的可行性与正确性.

关 键 词: 超声波传感器; 多目标; 探测定位; 高速数据采集

中图分类号: TP 216

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)12-1519-05

Multi-target detecting and positioning approach of mobile robot based on ultrasonic sensors

Wang Guofu Gao Feng Yang Xinhong Cui Ying

(School of Transportation Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To make mobile robot detect and locate scattered multi-targets accurately, a new intelligence measurement approach based on ultrasonic sensors was proposed. An array of three ultrasonic transceivers was employed to transmit approximate plane acoustic beam, and space coordinates were built. Three sensors sent timing ultrasonic pulses, while the digital signal processor sampled and analyzed the received echoes based on designed algorithm to complete the clutter filter, the recognition and extraction of characteristic signal data from the head wave echo, second echo and third echo etc. After detecting time-of-flight of the echoes of each channel correctly, the accurate location of the measured targets was calculated. Rods were adopted as the measured objects in the experiments, which coordinate value was calculated based on high-speed echo data acquisition and processing. Compared the calculated data with the actually measured data of the rod positions, results confirm the feasibility and validity of the method.

Key words: ultrasonic sensors; multi-target; detecting and positioning; high-speed data acquisition

在未知的非结构化环境下,自主移动机器人须具备良好的环境感测能力以实现其自动导航和避障功能. 基于超声波传感器的感测系统具有结构简单、体积小、性价比高等优点,而且对于被测处于黑暗、有灰尘、烟雾、电磁干扰、有毒等恶劣环境下有一定适应能力,在移动机器人领域,已被广泛地应用于障碍物测距、定位以及简单形体辨识等方面,也被应用于倒车雷达和医学导盲领域,并取得了良好的应用效果.

传统的超声波避障主要采用超声波测距的原理,由于超声波传感器具有波束角大,方向性差的特点,一路超声波收发系统只能完成简单的测距

收稿日期: 2010-05-06; **网络出版时间**: 2011-12-21 09:57; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111221.0957.015

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111221.0957.015.html

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(2010AA101405)

作者简介: 王国富(1969 -),男,河南南阳人,高级工程师, gfwch@ae.buaa.edu.cn.

功能而不能满足障碍物定位;为了扩展超声波的探测范围,常在移动机器人的不同方向上设置多路超声波收发信号[1],为了对障碍物进行方位判定常采用三角测量法[2],以此对单一传感器的探测局限性进行补偿. 近年来国际上采用超声换能器阵列方式或借用水声学的原理采用多传声器的方式[3-5],在被测物体定位上取得了不少的研究成果,即检测不同回波到达换能器的渡越时间,计算识别定位被测物体;由于采用了大量的换能器和传声器,所以成本较高;文献[6-8]从研究开发仿生系统,即通过数字信号处理技术从回波信号中提取更多的信息而不仅仅是回波首波的渡越时间成为一种新的趋势,其中一种技术是基于频谱的定位[6],它是蝙蝠发出的唧唧声信号和回波频率信号一同用于反射物的位置推断;在超声波定位精度上,也有学者作了相关研究[9].

本文提出一种 3 路超声波物位感测方法,该方法能探测多个离散目标的位置信息,即不仅可以获取移动机器人近距离的障碍物,给予准确的定位,也能探测较远的障碍物给予准确的定位,从而正确地给出机器人正确合理的路径规划. 该超声探测技术应用在全方位移动机器人或车辆上,对多个离散障碍物探测定位或穿越森林等有着重要的实际意义.

1 感测系统原理

由于超声探头在发射方向上声能较为集中,因而在该方向上能够传播较远的距离,超声波在传播过程中遇到障碍物或者不同介质的分界面就会产生反射,在探测范围内的回波信号可以用相同频率的超声换能器采集接收. 检测到探头发射到接收的渡越时间 Δt 后,可通过公式 $d = C \cdot \Delta t/2$ 求得被探测目标与探头的直线距离. 其中 C 为声波在介质中的传播速度.

为了给空间中被测目标定位,首先需要建立空间坐标系. 一个收发探头不能完成定位功能,需要至少 3 个探头来接收回波信号. 将 3 个收发一体的超声波换能器探头面向同一个方向布置在一个三角支架的 3 个顶点上,从而形成二维矩阵超声波波束生成器,在微控制器下定时发送低频超声波脉冲,3 路波形的叠加近似于平面声波的传播,探头同时接收被探测物体反射的回波脉冲信号. 3 路回波信号通过高速数据处理后,在给定的算法下进行滤波、特征信号识别提取,通过计算给出多个被测物体的准确定位. 并可将采集数据通过 485 或 HART 传送到远程上位机里,对被测物体的形状作进一步的分析. 如图 1 所示的感测定位坐标系中,3 个收发一体的超声波探头布置在一个正三角形的 3 个顶点 A,B,C 上,发射超声波垂直于三角形平面,被探测目标位于空间中的 P 点. 在 AB 边的中点建立坐标系的原点 O,沿 CO 方向建立坐标系的 z 轴,沿 BA 方向建立坐标系的 y 轴,经 O 点垂直于三角形平面的方向建立坐标系的 x 轴.

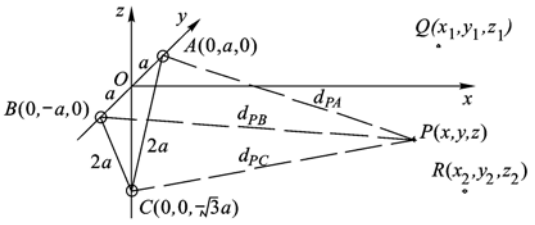


图 1 感测定位系统坐标系

若正三角形的边长为 $2a$,则 P 点坐标(x,y,z)与 3 个顶点的距离 d_{PA},d_{PB},d_{PC}有如下的关系:

$$\left.\begin{aligned} x^2 + (y-a)^2 + z^2 &= d_{PA}^2 \\ x^2 + (y+a)^2 + z^2 &= d_{PB}^2 \\ x^2 + y^2 + (z+\sqrt{3}a)^2 &= d_{PC}^2 \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

由此导出

$$\left.\begin{aligned} x &= \sqrt{d_{PC}^2 - \frac{(d_{PB}^2 - d_{PA}^2)^2}{16a^2} - \frac{(2d_{PC}^2 + 8a^2 - d_{PA}^2 - d_{PB}^2)^2}{48a^2}} \\ y &= \frac{d_{PB}^2 - d_{PA}^2}{4a} \\ z &= \frac{2d_{PC}^2 - d_{PA}^2 - d_{PB}^2 - 4a^2}{4\sqrt{3}a} \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

依据以上关系,只要检测出 P 点到 A,B,C 3 点的距离即可对 P 点在坐标系中定位.

对于空间中多个离散目标的情况,每个超声波探头只接收到一个回波信号是不够的,还需检测多次回波信号,其中检测到的回波首波信号是最近目标点的回波信号,而后面的二次三次等回波信号为距探头较远的被测目标 Q,R 点的回波信号. 多个回波信号可采用高速数据采集处理技术来完成.

若超声波换能器波束角为 ϕ,在其最大探测方向上,被测目标 P 点距超声波发射探头 A,B 的距离为 d_{PA},d_{PB},如图 2 所示. 则有

$$d_{PB} = \sqrt{r^2 + d_{PA}^2 + 2rd_{PA}\sin\frac{\phi}{2}} \tag{3}$$

两路声程差:

$$\Delta = d_{PB} - d_{PA} = \sqrt{r^2 + d_{PA}^2 + 2rd_{PA}\sin\frac{\phi}{2}} - d_{PA} \tag{4}$$

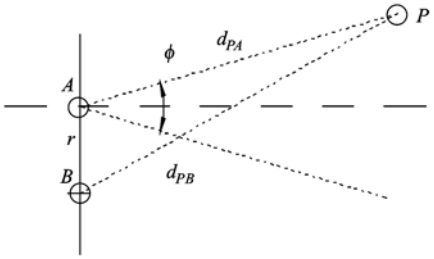


图 2　被测目标与换能器的声程

因为$\frac{\partial \Delta}{\partial d_{PA}} < 0$,所以声程差随距离的增加而减小.

当 $r = 0.1$ m, $d_{PA} = 0.4$ m, $\phi = 15°$时,不同探头接收的最大声程差 $\Delta = 0.0248$ m,对应声波在空气中传输的时间差约为 72.9 μs.

当 $r = 0.1$ m, $d_{PA} = 1$ m, $\phi = 15°$时,不同探头接收的最大声程差 $\Delta = 0.0179$ m,对应声波在空气中传输的时间差约为 52.6 μs.

当目标物体与探头之间的距离增大时,最大声程差 Δ 会进一步减小. 所以 3 个接收探头接收到的回波特征信号的时间差若小于 72.9 μs 时,就不能识别出两个目标点,而可认为是对应同一个被测目标物体的回波信号.

为了拓展该技术的用途,可以将其应用于空间中离散的杆状物体探测,3 个探头接收的首波回波信号均为被测杆件上距探头最近点的回波,由于被测物体有一定的体积,所以公式的计算结果比实际杆件目标稍近一点. 图 1 中,当 d_{PA}, d_{PB}, d_{PC}远大于探头间距 $2a$ 时,该误差可以忽略不计. 这样,该探测技术可以应用于移动机器人或车辆上,在穿越森林时避障和目标定位发挥重要作用. 以下的实验来验证该方法的可行性和正确性.

2　实验装置与测量结果分析

本实验中采用 3 个收发一体的超声波探头,被测目标是几个杆件物体. 测试系统的功能原理如图 3 所示.

实验采用 3 个收发一体的超声波静电换能器以正三角形阵列布置,线路经改造后接入微控制单元,每隔 1 s 定时发送一组频率为 47.5 kHz 的超声波脉冲信号,经过三极管和变压器变换得到 400 V 脉冲信号去驱动静电换能器,探测的最大距离为 12 m,波束角为 15°. 为了只接收被测物体的回波信号,避免自身发射信号的干扰,在探头发射脉冲后启动短暂的消隐控制可选择性地排除回波,这样 40 cm 内的目标为感测盲区. 被探测目标的回波信号经 LC 选频网络选定 47.5 kHz 的回

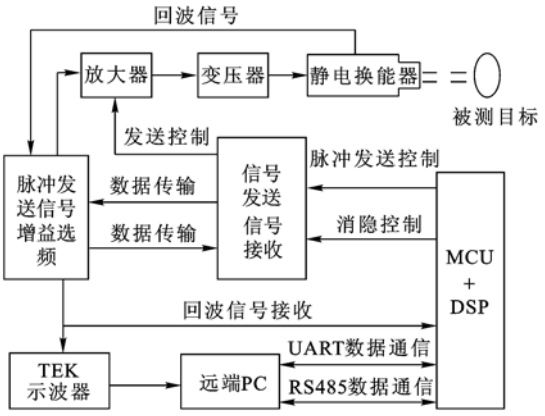
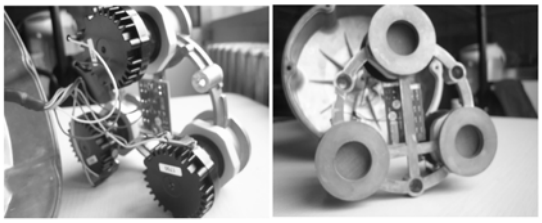
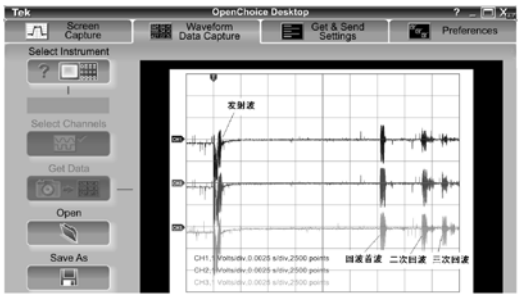


图 3　系统工作原理

波,再将回波信号进行放大,被超声换能器接收并传送到 Tektronix TDS 2014B 示波器显示. 实验所用探头及回波检测示波器如图 4 所示.



a　探头背面　　b　探头正面



c　3 路超声波及其回波信号

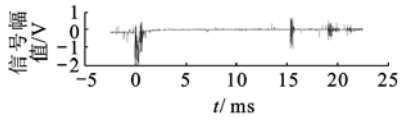
图 4　实验探头及示波器 3 路回波信号

图 4a,图 4b 为实验所用超声波探头的两面,实验过程中,探头正面对着被测物体,图 4c 为 3 路超声波发射及其回波信号,其中 CH1, CH2, CH3 为 3 个探头分别连接在示波器的数据采集通道,即同时采集 3 路数据信号.

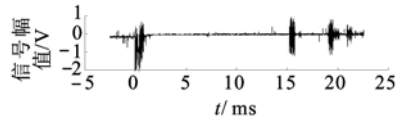
采用 NI LabVIEW SignalExpress 对信号进行捕获和存储,如图 5 所示. 其中上面的一路为通道 1 采集的信号,连接 A 点超声波探头,中间的一路为通道 2 采集的信号,连接 B 点超声波探头,下面一路为通道 3 采集的信号,连接 C 点超声波探头. 捕获信号显示在距超声波探头发射时刻 15 ms, 19 ms 和 21 ms 等处附近有较强的回波信号.

要获取被测物体的位置,就要从回波信号中

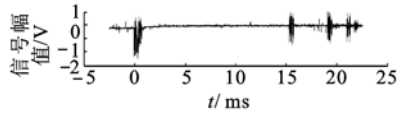
提取相关的特征数据,本文需要提取回波首波、二次回波和三次回波到达不同超声换能器的渡越时间.



a 通道 1 采集信号



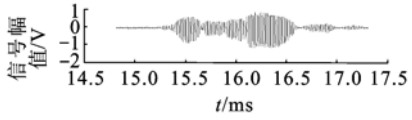
b 通道 2 采集信号



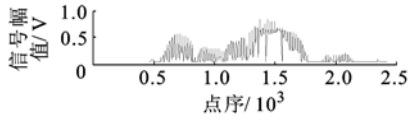
c 通道 3 采集信号

图 5 示波器采集的 3 路信号

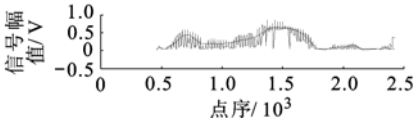
对其中任一束回波的处理过程如图 6 所示,简要如下:首先获取该波段所有正值的极值点,然后采用高次样条拟合极大值得到上包络线. 根据包络线的变化斜率和回波强度的变化识别出各路回波到达的初始时间,实验中以达到回波最大幅值的 15% 的信号对应点开始依据算法判断该点是否是有效回波信号.



a 原始回波信号



b 回波极值点



c 回波上包络线

图 6 回波信号的处理

实验测得数据如表 1 所示.

表 1 被测多目标回波渡越时间 Δt

被测目标	Δt/s		
	通道 CH1	通道 CH2	通道 CH3
杆 1	0.015 28	0.015 24	0.015 26
杆 2	0.019 03	0.019 10	0.019 06
杆 3	0.020 93	0.020 90	0.020 91

已知探头间距 $2a = 0.1$ m,取环境声速 $C = 340$ m/s,将数据代入式(2)计算出被测杆件上 3 点坐标(单位:m):

$$P\ (2.587\,6,\ -0.176\,4,\ -0.028\,9)$$

$$Q\ (3.217\,1,\ 0.385\,7,\ -0.060\,9)$$

$$R\ (3.550\,0,\ -0.181\,3,\ -0.063\,8)$$

由求出的杆件上的坐标点即可对 3 个竖直杆件分别进行定位,实际物位与计算物位见图 7.

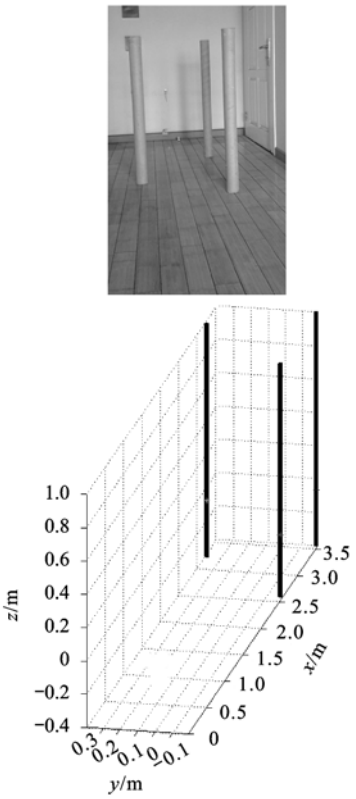


图 7 系统对 3 个竖直杆件的定位

计算与实测数据比较,如表 2 所示.

表 2 计算与实测比较

距离定义	距离/m	
	计算	实测
杆 1 距原点	2.593 6	2.62
杆 2 距原点	3.240 1	3.27
杆 3 距原点	3.554 6	3.61
杆 1 距杆 2	0.843 9	0.82
杆 2 距杆 3	0.657 5	0.63
杆 3 距杆 1	0.962 5	0.98

实验结果显示,回波信号的处理可以对被测目标定位,由计算与实测数据的比较,可以看出探头与杆件或杆件之间定位精度小于 5%. 误差来源主要由于以下几个方面:①被测物体较大时,3 个探头采集的回波信号代入公式计算时,计算的探头与目标之距稍小于实际值;②回波信号首波判断的算法模型需要进一步完善;③被测杆件不完全竖直;④3 个探头的布置有误差;⑤声速需要修正;⑥实验过程中环境噪声的干扰;⑦测量误差.

在 3 个超声波探头建立的探测系统中,不仅可以对竖直的杆件进行定位,而且对于倾斜程度不大的杆件,3 个探头也能较好地探测出其相对位置. 探测的方法是获取被测倾斜杆件上的两个点即可. 当完成第 1 次测量后,获取了杆件上的一个点,然后,在垂直方向上平移探头作第 2 次测量即可获取第 2 个点,经坐标变换到原始坐标系后,将同一个杆件上的两个检测点连线,即为倾斜杆件的位置. 以此方法进行实验完成有一定倾斜度的杆件的定位,计算结果显示能近似反映出实际的物位,如图 8 所示.

实际应用中,考虑到采集信号数据量大,实时性高的要求,图 3 中 MCU 和 DSP 采用 ADI 公司的 BlackfinDSP 系列芯片完成, ADSP-BF561 具有控制和高速数据采集功能,处理速度达 500 MHz 以上,完全能满足 47.5 kHz 的超声波信号的实时采集及处理要求. 软件方面,配合以 AD 公司的仿真系统, VisualDSP 环境下使软件开发简单便捷. 采集的数据可通过 485 或 HART 传送到远端上位机里,对被测目标的物位作进一步的分析.

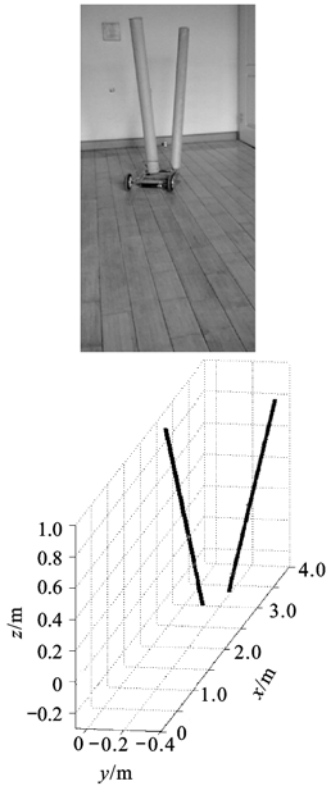


图 8　系统对倾斜杆件的定位

3　结 束 语

采用 3 个收发一体的超声波换能器阵列定时发送近似的平面声波波束,并检测被测物体的各路回波,可以在空间坐标系内对被测物体感测定位;通过高速信号采集手段检测被测范围内不同离散目标的回波首波及多次回波,不仅可以探测定位距探头较近的物体,而且可以探测出距探头较远的物体;不仅可以定位探测范围内离散的点,而且可以探测定位杆状物体,通过实验验证了理论和方法的可行性和正确性. 对该探测技术的完善可以使其应用在移动机器人或车辆的森林避障,也可应用在声呐对水下移动目标的探测定位上.

参考文献（References）

[1] 王洪青,褚金奎,李荣华,等. 并行超声波测距系统在移动机器人上的应用[J]. 传感器与微系统,2008,27(9):115 - 117
Wang Hongqing, Chu Jinkui, Li Ronghua, et al. Application of parallel ultrasonic distance measurement system in mobile robot [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(9): 115 - 117(in Chinese)

[2] Gearhart C, Herold A, Self B, et al. Use of ultrasonic sensors in the development of an electronic travel aid[C]//IEEE Sensors Applications Symposium. New Orleans, LA: [s. n.], 2009: 275 - 280

[3] Hernandez A, Urena J, Garcia J J, et al. Ultrasonic ranging sensor using simultaneous emissions from different transducers [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2004, 51(12): 1660 - 1670

[4] Harput S, Bozkurt A, Gurunlu sok, et al. Ultrasonic phased array device for acoustic imaging in air[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(11): 1755 - 1762

[5] Strakowski M R, Kosmowski B B, Kowalik R, et al. An ultrasonic obstacle detector based on phase beamforming principles[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(1): 179 - 186

[6] Reijniers J, Peremans H. Biomimetic sonar system performing spectrum-based localization[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(6): 1151 - 1159

[7] Mueller R, Kuc R. Biosonar-inspired technology: goals, challenges and insights[J]. Bioinspiration and Biomimetics, 2007, 2(4): 146 - 161

[8] Kuc R. Biomimetic sonar and neuromorphic processing eliminate reverberation artifacts[J]. IEEE Sensors Journal, 2007, 7(3): 361 - 369

[9] 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,2009,39(1):188 - 193
Jiang Lin, Yan Jihong, Zang Xizhe, et al. New method for ultrasonic absolute localization[J]. Journal of Jilin University, 2009, 39(1): 188 - 193(in Chinese)

(编　辑:张　嵘)