一种大角度范围的高精度超声波测距处理方法

孙牵宇, 童 峰, 许肖梅*
(厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 针对移动机器人超声定位中超声收发传感器角度偏向造成的测距精度下降, 本文提出了一种基于归一化波形参数特征修正的超声测距系统. 传统的增益控制、可变阈值等抗起伏措施对抑制传播过程中的幅度起伏造成的测距误差效果较好, 但如果传感器角度偏向使波形发生畸变, 此类方法仍将造成较大误差. 本文通过对传感器角度偏向造成接收信号波形畸变及测距精度下降的理论分析及实验研究, 建立了超声接收信号归一化波形特征脉宽与前沿变化的关系, 设计了基于单片机实现误差校正的大偏向角高精度超声波测距系统. 测距实验结果表明本系统显著减小了传感器角度偏向引起的测距误差, 在不同的距离上使测距精度平均提高了 1.6%, 同时具有成本低、使用简单、方便的特点.

关键词: 移动机器人定位; 超声测距; 角度偏向
中图分类号: TP 274.53 文献标识码: A 文章编号: 0438-0479(2006)04-0513-05

由于超声波测距有不受光线影响、结构简单、成本低、信息处理简单可靠、易于小型化和集成化等优点, 因此, 广泛应用于移动机器人定位及导航系统[1,2].

超声测距的精度直接决定了机器人超声波定位的精度性能, 目前许多提高超声波测距精度的研究集中在考虑传播过程中幅度起伏造成的误差[3~6], 采用增益控制、可变阈值、零交叉点等抗起伏措施保证触发时刻的稳定, 实现超声信号飞行时间(TOF, time of flight)检测精度的提高. 上述方法取得精度提高的前提是接收信号的归一化波形保持不变.

Lamancus[7] 的研究表明, 当超声收发传感器轴线存在一定偏角、超声波信号偏向入射时接收信号波形会产生畸变, 特别是偏角比较大的时候, 如移动机器人定位中在机器人活动范围内当发射与接收传感器处于大偏向角位置时, 波形由于信号斜入射而畸变大大降低了传统方法下的测距精度. 这个问题严重影响了超声波定位系统在自动导引车高精度停靠等需要高定位精度、大偏角范围场合的应用. 如童峰等人研制的机器人超声波导航系统[8], 在小偏向角度下(轴线方向上)定位精度为 1 cm, 在大偏向角度下精度下降为 5 cm.

本文根据波形畸变理论和实验的分析, 针对传感器的发射角和入射角所引起的误差, 提出了一种可适用于大角度范围工作条件的处理方法并设计了基于单片机的系统, 实现简单方便. 实验结果表明: 本系统最终在大角度测距时使测距精度平均提高了 1.6%.

1 超声测距系统原理及影响测距精度的因素

1.1 影响测距精度的因素

除声速变化、噪声等影响因素外, 声波在空气介质中声速的变化及散射, 衰减的随机不均匀性, 引起接收信号在幅度和时间轴上的起伏, 是造成测距误差的一个主要原因. 图 1 所示为固定门限电平检测下由幅度起伏引起触发电路的信号前沿不同, 产生飞行时间(Time of flight)检测误差, 起伏变化越大引起的误差就越大. 针对这个问题提出的可变门限[3]、前沿线性前推[4]、零交叉点检测等处理方法, 这些方法一个共同的前提就是幅度起伏时, 信号的归一化波形基本不变(如图 1 中实线波形所示), 如果波形发生了畸变(如图 1 中虚线波形所示), 仍将造成较大的检测误差.

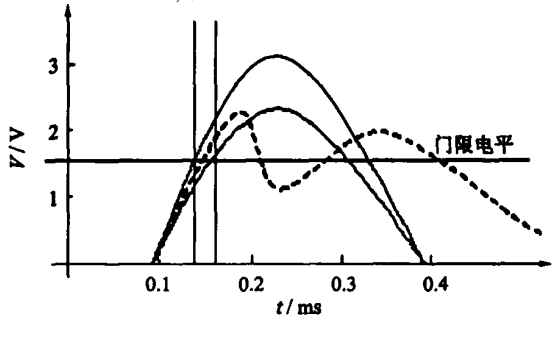

图 1 幅度起伏(虚线是畸变波形)

Fig. 1 Amplitude fluctuations (dashed: distorted waveform)

收稿日期: 2005-09-22
基金项目: 国家自然科学基金(D0602-40476018), 厦门大学科技创新基金(0050-K70013)资助
作者简介: 孙牵宇(1982-), 男, 硕士研究生.
* 通讯作者: xmxu@xmu.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.2 信号传输过程分析及斜入射影响

(1) 接收超声脉冲信号波形的数学模型[9,10]

超声脉冲信号接收信号的波形和发射传感器、发射激励、空气对超声信号的吸收和散射、发射角、入射角有关. 为简化分析起见, 我们对这些作用因素进行建模分析如图 2.

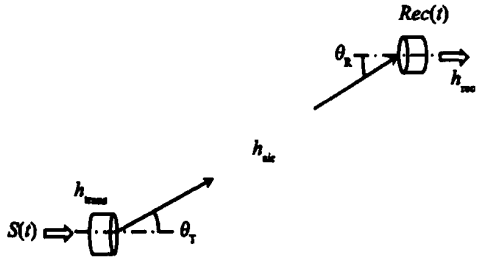

图 2 信号传播过程

Fig.2 Process of transmission

假定 $S(t)$ 为发射端加的激励信号, 则:

$$Rec(t, \theta_T, d, \theta_R) = S(t - \frac{d}{c}) \cdot h_{trans}(t, \theta_T) \cdot \frac{1}{d} h_{air}(t, d) \cdot h_{rec}(t, \theta_R)$$

其中: $h_{trans}(t, \theta_T) = h_0(t, \theta_T) \cdot h_T(t)$, $h_{rec}(t, \theta_R) = h_0(t, \theta_R) \cdot h_R(t)$, $Rec(t, \theta_T, d, \theta_R)$ 为接收波形, h_{trans}, h_{air} 和 h_{rec} 分别是以 θ_T 发射角时的发射传感器、空气介质的吸收和散射, θ_R 为入射时的接收传感器的脉冲响应. h_0 是角度偏向的脉冲响应, h_T 和 h_R 是传感器的脉冲响应.

式中空气介质 h_{air} 造成的接收波形变化在较近距离内可近似认为只有幅度上的影响[5], 而超声换能器本身的特性 h_T 和 h_R 对波形的影响是固定的. 因此, 接收信号波形主要受传感器发射角和接收角的影响, 下面分析斜入射对接收信号波形的影响.

(2) 发射角和入射角对接收信号的影响

从接收传感器进行理论分析, 在远场时(一般应用场合均满足), 入射超声波可看成是平面波, 令入射波对传感器的激励强度正比于入射波与传感器面的相交区域的面积, 则传感器的输出信号也正比于这个相交区域的面积. 对圆形入射面的接收传感器, 如图 3.

当入射的平面波垂直入射时, 对传感器的激励发生在同一时刻, 同一作用强度, 则其脉冲响应可看作一冲激信号, 即垂直入射时不影响输出波形的形状和频谱; 当入射波以角度 θ 入射时, 入射平面波从传感器面的一端开始扫过整个传感器面, 在任一时刻相交区域是传感器面上的一条弦, 则对传感器的激励强度曲线即脉冲响应曲线为传感器面一端到另一端的一族平行弦的弦长, 时域上是一个半椭圆[9].

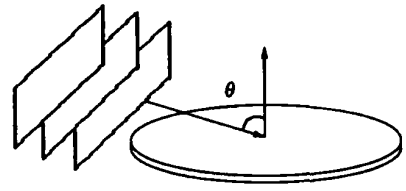

图 3 信号斜入射

Fig.3 Signal reception under angular misalignment

$$h_{rec}(t, \theta) = \begin{cases} \frac{4c\cos\theta}{\pi D \sin\theta} \sqrt{1 - \left(\frac{2t}{t_w}\right)^2}, & -\frac{t_w}{2} < t < \frac{t_w}{2} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

其中, D 是圆形接收换能器的直径, c 为空气中声速, t_w 是入射平面波从传感器面的一端开始扫过整个传感器面所用的时间. 根据传感器的互易原理, 发射传感器发射角对接收信号的脉冲响应可写为:

$$h_{rec}(t, \theta) = h_{trans}(t, \theta) = h_0(t)$$

所以, 当测距超声波信号垂直入射传感器时, $h_0(t)$ 表现为全通滤波器, 接收信号波形与两传感器互相对准时的接受信号波形基本一致, 而当发射和接收出现越来越大的角度时, 接收波形等效于脉冲响应为一越来越宽的椭圆曲线的滤波器, 频域上表现为截止频率趋低的低通滤波器, 此时所得到的接收信号波形与两传感器互相对准时的接受信号波形有显著不同. 因此, 可变门限[4]、前沿线性前推[5]、零交叉点等处理方法在发射接收角度较小的条件下可有效提高精度, 但对于较大的角度偏向造成波形畸变, 效果将大大下降.

2 波形前沿与波形特征宽度关系研究

针对这个问题, 本文提出根据信号畸变中波形特征参数的变化对检测误差进行校正的思路. 考虑到移动机器人超声波定位系统中通常要求超声测距部分结构简单、实现方便, 本文选取易于获取的 1/2 峰值为门限所得信号脉宽作为波形特征宽度, 并通过实验研究其与前沿变化的关系.

2.1 实验数据

在温度为 28℃ 的条件下, 在实验室内, 设置收发传感器的距离为 35 cm, 固定接收传感器, 使发射传感器在以接收传感器为圆心, 半径分别为 35 cm 的圆弧上移动, 移动的角度范围在 0° 到 60° 之间.

为补偿斜入射造成信号幅度的下降, 对波形进行归一化处理后, 测量各偏向角度下接收信号 1/2 峰值处的波形特征宽度 T_w 和波形前沿的位置 T_p. 图 4 为

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

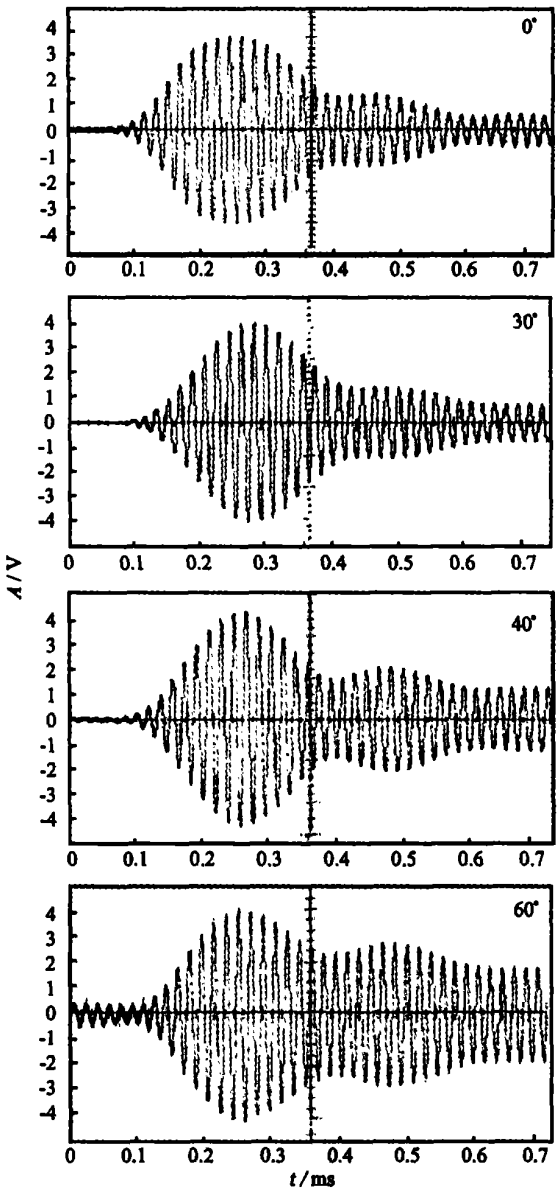

图 4　不同偏向角度下的接收波形

Fig. 4　Reception waveforms at different angular misalignment

收发传感器相距 35 cm 时同一触发时间下测得的入射角度分别为 0°, 30°, 40°, 60° 的接收波形. 可发现随着偏向角度的加大, 接收归一化波形的特征宽度先减小再增加, 而波形前沿先稍微前移, 然后一直向后移. 由此可知, 对归一化处理后的波形进行阈值检测虽可抑制幅度起伏引起的触发时刻漂移造成的 TOF 检测误差, 但在大偏向角情况下触发电路的信号前沿前移, 检测结果将明显小于真实值, 产生较大误差.

2.2　误差修正原理

图 5 是根据距离为 35 cm 处测得的数据而画出前沿触发时刻和特征宽度随偏向角的变化曲线. 定义

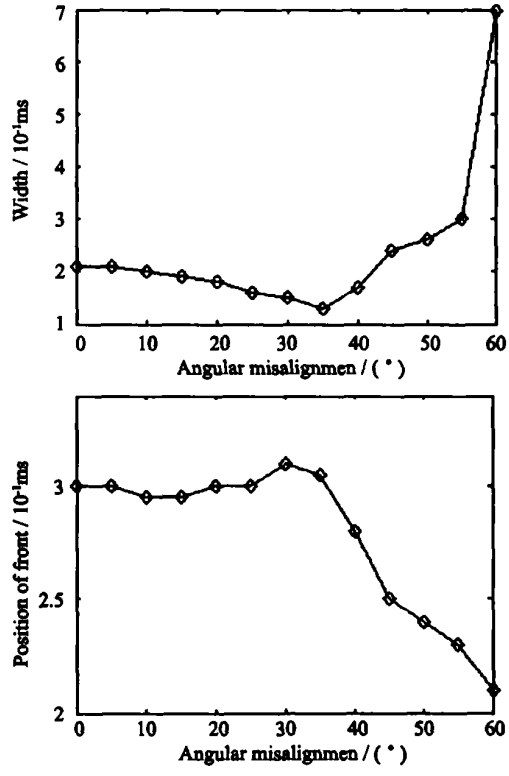

图 5　T_w 和 T_p 的变化曲线

Fig. 5　Curves of T_w and T_p

ΔT_w 为接收波形特征宽度相对于入射角 0°(即垂直入射) 时的变化量, 则根据图 5 曲线可看出在入射角小于 40° 时, 波形的前沿变化不大($\Delta T_w < 0.2$ ms), 此时不会产生大的门限检测的误差; 而偏向角在 40° ~ 60° 之间时, $\Delta T_w > 0.2$ ms, 波形的前沿有较明显变化, 影响了门限检测的精度, 造成较大误差. 我们本着设计简单、易实现的初衷, 根据在大偏角情况下前沿到达时刻和波形特征宽度分别呈减小和增加的趋势, 提出下列修正误差的方法:

(1) 当 0.4ms > ΔT_w > 0.2 ms 时, $T_2 = T_1 + 0.04$ ms; 其中, T_1 是误差补偿前的前沿位置, T_2 是误差补偿后的检测结果.

(2) 当 $\Delta T_w > 0.4$ ms 时, $T_2 = T_1 + 0.06$ ms;

这样我们就可以通过获得 ΔT_w 的值来对 T_p 进行补偿, 经过校正后所得到的前沿触发时刻 T_2 再减去一固定偏移值即可得到不同偏向角条件下的高精度 TOF 检测结果.

3　新的高精度处理方法

3.1　系统设计

根据上述分析, 我们设计了基于单片机的大角度超声波高精度测量系统. 该测距系统结构框图如图 6

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

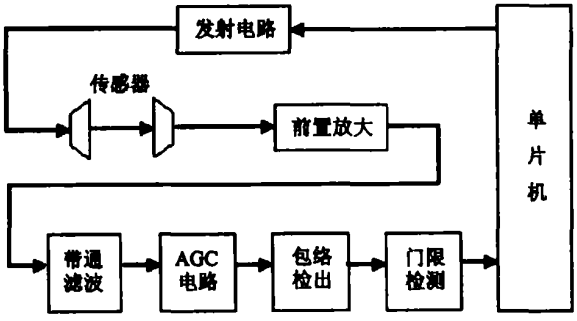

图 6 系统框图

Fig. 6 Block chart of the proposed system

所示. 用单片机产生脉冲信号通过传感器发出 40 kHz 的超声波. 接收信号经放大、带通滤波, 然后经过 AGC(自动增益控制) 电路使信号幅度保持稳定, 通过检波电路检出波形包络并经过 1/2 峰值门限的比较器, 输出信号送单片机, 单片机记录信号前沿触发时刻 T_p(用来计算测距的距离), 及持续宽度 T_w(波形特征宽度, 用来修正误差), 并根据上述的 ΔT_w 和 T_p 关系进行误差校正, 最后输出高精度测距数据.

3.2 实验结果

本实验的数据是在实验室内, 温度为 28 ℃ 的条件下得出的. 固定接收传感器, 使发射传感器在以接收传感器为圆心, 半径分别为 270 mm, 470 mm, 570 mm, 900 mm 的圆弧上移动, 移动的角度范围在 0° 到 60° 之间(- 60° 到 0° 范围数据可根据对称性获得). 考虑到超声传感器本身的发射接收指向较尖锐(本实验中采用的传感器 3 dB 主波束角为 ±40°), 大偏角接收时信噪比大大下降, 实验设置的工作距离在 1 m 内.

为了比较修正前后的精度变化情况, 本文对 AGC 增益控制稳定信号幅度后直接检测和本文方法的测距精度进行比较实验, 考虑到可变阈值和零交叉点等方法和增益控制方法本质上都是针对幅度起伏的, 因此当波形畸变时, 其测距误差变化趋势大致相同. 根据实验数据画出在 4 个不同距离上修正前和修正后的测距性能对比图(图 7). 从图 7 可看出, 随着偏向角度的增大, 增益控制检测的测距误差也逐渐增大, 特别是在大于 40° 后误差增加明显. 当采用本文提出的误差修正处理后, 误差得到较好的补偿, 1 m 范围内大偏向角(±60°) 情况下测距精度从 12.24 mm 显著提高到了 3.4 mm.

4 结 论

为了提高移动机器人超声定位等需要大工作范围场合下的超声测距精度, 本文通过对大角度偏向造成信号波形畸变的研究, 在超声测距系统中引入了角度

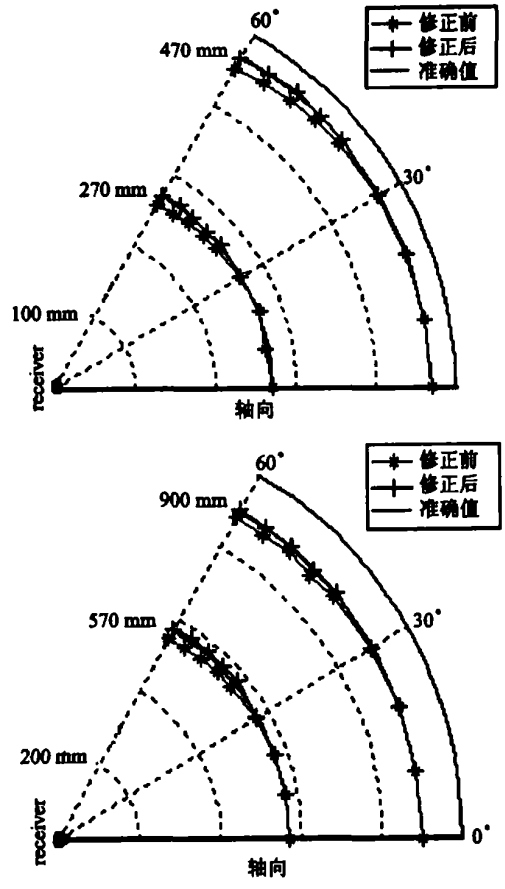

图 7 测距实验结果

Fig. 7 Experimental results of distance measurement

偏向误差修正技术, 利用接收波形的特征宽度来对波形前沿进行校正, 使门限检测飞行时间 TOF 的精度提高.

实验结果表明此修正方法简单实用, 与增益控制检测处理方法相比超声测距系统的大偏角(±60°) 工作精度明显提高. 且系统结构简单、实现方便, 适用于自动导引车高精度停靠、机器人高精度定位、虚拟现实系统人机交互输入等需要较大工作角度、高测距精度的场合.

考虑到本文采用的超声传感器指向特性较尖锐(3 dB 主波束角为 ±40°), 本实验中的大偏角测距距离较小(1 m 内), 但这已能满足自动导引车停靠等需较近距离、高精度定位的场合的要求. 若采用具有更宽的主波束角的超声波传感器, 工作距离将可进一步扩大. 同时, 本文采用的波形修正参数只适用于本实验中采用的换能器及滤波电路, 对于不同指向特性、频率特性的换能器及滤波电路, 本文方法中的修正参数需重新设定.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献:

[1] 贾莉娜. 高精度的超声波测距系统在移动机器人导航方面的应用[J]. 计量与测试技术, 2004(9): 23- 26.

[2] 罗本成, 原魁, 楚坤水, 等. 一种超声测距的鲁棒自适应建模方法[J]. 机器人, 2002, 24(1): 554- 558.

[3] 杨劲松, 王敏, 黄心汉. 超声波可变阈值测距装置[J]. 电子技术应用, 1998, 24(7): 7- 9.

[4] 王春麟. 提高超声回波检测测距精度的方法[J]. 电测与仪表, 1995, (2): 22- 24.

[5] 童峰. 自动导引车超声导引系统研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2000.

[6] Figueroa J F, Doussis E. A hardware-level method to improve the range and accuracy of an ultrasonic ranging system[J]. ACUSTICA, 1993, 78: 226- 232.

[7] John S Lamancusa, Fernando Figueroa J. Ranging errors caused by angular misalignment between ultrasonic transducer pairs[J]. J. Acoust Soc. American, 1990, 87(3): 1327- 1335.

[8] 童峰, 许天增. 一种移动机器人超声波导航系统[J]. 机器人, 2002, 24(1): 55- 61.

[9] Teruko Yata, Lindasy Kleeman, Shin′ichi Yuta. Fast bearin measurement with a single ultrasonic transducer[J]. The International Journal of Robotics Research, 1998, 17(11): 1202- 1213.

[10] Lindsay kleeman, Oman Kuc. Mobile robot sonar for target localization and classification[J]. The International Journal of Robotics Research, 1995, 14(4): 295- 318.

A High Precision Ultrasonic Ranging Method under Misalignment of Transducer Pairs

SUN Qian-yu, TONG Feng, XU Xiao-mei*

(Key Laboratory of Underwater Communication and Marine Information Technology of MOE, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: To tackle the precision degradation caused by misalignment of transducer pairs in mobile robot localization, an adjustment strategy based on normalized waveform parameter is proposed to derive a high precision method for wide-field ultrasonic ranging. Presently most investigation on high precision ultrasonic ranging focused on the amplitude fluctuation induced by random air medium. Nonetheless, previous research indicated that the impact of transducer misalignment on reception signal waveform can be modeled as a low-pass filter, which will cause waveform distortion of reception signal. Thus the performance of traditional approaches to improve the ultrasonic ranging precision such as automatic gain control (AGC) or variable threshold will be seriously affected under misalignment of transducer pairs. In this paper, with theoretical analysis and experimental research on the impacts of transducer misalignment, the relationship between the rising edge and characteristic width of normalized waveform is investigated, which is used to develop an adjustment approach and design a SCM (Single Chip Microcomputer) based high precision wide-field ultrasonic ranging system. The experimental results show this system greatly improves the ranging precision under transducer misalignment, validating the effectiveness and convenience of the proposed scheme. Compared with traditional AGC type method, it improves the ranging precision by about 1.6%.

Key words: mobile robot localization; ultrasonic ranging; angular misalignmen

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net