

# 基于数字信号处理的超声波测距系统设计

## Design of Ultrasonic Ranging System Based on Digital Signal Processing

严双利 符影杰 (东南大学自动化学院,江苏 南京 210096)

**摘要:**超声波测距在工业领域有着非常广泛的应用。为了解决传统的模拟方法在测距精度和抗干扰能力上的不足,提出一种基于数字信号处理方法的超声测距系统的设计方案。该系统由超声换能器、超声波发射和接收电路、NI 数据采集设备组成。使用 LabVIEW 进行上位机软件开发,完成信号采集、数据处理、图形化显示等功能。研究并实现互相关法为核心的测距算法。通过实验证明,系统具有良好的测距准确度和稳定性。

**关键词:**超声波测距;LabVIEW;信号采集;互相关法

**Abstract:**Ultrasonic ranging is widely used in the industry.In order to solve the shortcomings of the traditional analog method in ranging accuracy and anti-interference ability,a design based on digital signal processing is proposed in this paper.The system consists of ultrasonic transducers, ultrasonic transmitting and receiving circuits,and NI data acquisition equipment.The host computer software is developed through LabVIEW to complete functions such as signal acquisition,data processing,and graphical display.The ranging algorithm based on the cross-correlation method is studied and implemented.Experiments show that the system has good ranging accuracy and stability.

**Keywords:**ultrasonic ranging,LabVIEW,signal acquisition,cross-correlation method

超声波测距是一种常见的非接触式测量方法,具备安装简单、成本低、精度高等优势,并且在恶劣环境下有着良好的适应性,被广泛应用于物位测量、环境地形勘测、机器人定位与导航等领域<sup>[1]</sup>。随着超声波探测技术的应用场景不断拓展,对超声波测距系统的功能和精度也提出了更高的要求。目前常见的超声测距方案主要是以微处理器为控制核心,使用模拟方法进行检测,在复杂信号运算和信号特征分析上的能力较为薄弱。相较于传统模拟方法,数字信号处理的方式具有灵活程度高和抗干扰能力强的优点,数字端设备也提供了精度和性能上的优势。本文利用 NI PXI 数据采集平台高效的采集性能和 LabVIEW 软件平台强大的信号运算分析能力,配合超声波发射和接受电路,设计超声波测距系统。重点从数字信号处理的角度出发,在 LabVIEW 软件平台上实现以互相关法为核心的超声渡越时间(TOF)估计算法框架,提高超声波测距系统的测量精度和抗干扰能力。

### 1 系统设计

本文的超声波测距系统如图 1 所示,主要由超声换能器、超声波发射和接收电路、NI PXI 数据采集平台和 LabVIEW 软件平台组成,各模块具体细节如下:

#### (1)超声换能器

超声换能器型号采用欧赛龙 40D19TR-1 收发一体式超声换能器,用于发射和接收超声波,中心频率为 40 kHz,探头余振持续时间小于 0.8 ms,波束角在 75±10°范围内,在实际使用中有较好的性能。

#### (2)超声波发射电路

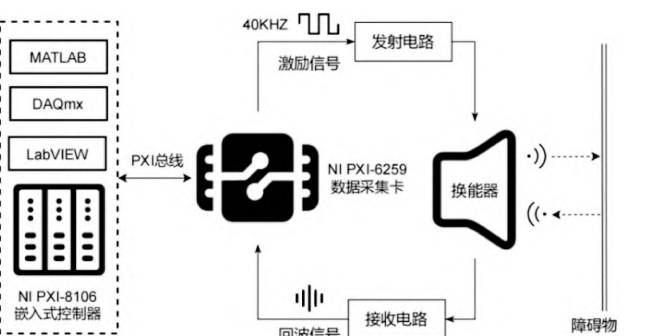


图 1 超声测距系统结构图

超声换能器发射超声波时,需要一个特定的激励信号,激励信号的频率应接近换能器中心频率,同时需要较高的驱动电压。由于控制器输出信号驱动能力较弱,本文设计了如图 2 所示的超声波发射电路,将控制器输出的激励信号通过光电耦合器进行初次放大,以达到驱动变压器的要求,随后接入变压器产生高压脉冲信号并直接驱动超声换能器产生超声波。

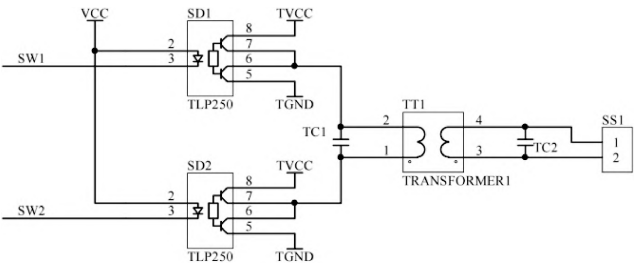


图 2 超声波发射电路

#### (3)超声波接收电路

超声波在空气中传播时存在衰减现象,并且衰减的程度随着传播距离增大以指数趋势增加,一般情况下换能器接收到的超声波回波信号幅值较小(毫伏级),同时回波信号中不可避免会存在噪声干扰,会导致后续无法有效识别回波的问题<sup>[2]</sup>。因此本文设计了如图 3 所示的超声波接收电路,输入端是超声换能器接收到的原始回波信号,首先采用双向二极管对输入信号限幅,防止发射电路中的高压信号进入接收电路。随后通过一个前置放大电路和一个带通滤波放大电路,滤除外部噪声干扰,同时将回波信号的幅值放大至易于识别的范围。

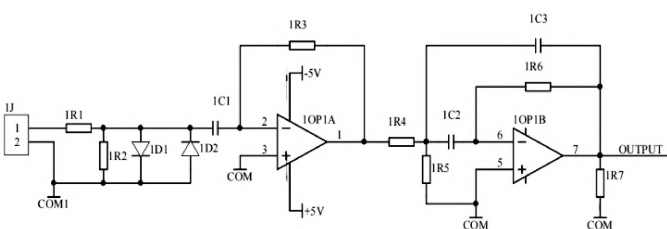


图 3 超声波接收电路

#### (4)NI PXI 数据采集平台

为了后续在数字平台上实现超声测距算法,本文使用 NI

PXI-6259 DAQ 数据板卡进行信号采集和输出。PXI-6259 拥有 32 路模拟输入通道、4 路模拟输出通道、48 路数字 I/O 通道、16 位 A/D 转换器,单通道的最高采样率为 1.25 MS/s,时间分辨率为 50 ns,各项性能参数可满足采集所要求的速率和精度。在本系统中,PXI-6259 数据采集卡内嵌于 NI PXI-1042Q 机箱中,使用机箱内部 PXI 总线和机箱内的 NI PXI-8106 嵌入式控制器进行连接。NI PXI-8106 嵌入式控制器内部安装了 Windows 操作系统,并配置了 DAQmx 驱动软件。运行在控制器上的 LabVIEW 程序可以控制 NI PXI-6259 数据板卡进行信号采集和信号输出。该部分在整个超声波测距过程中主要负责两个方面的功能:①在发射超声波时,控制板卡连续输出 8 个频率为 40 kHz 的矩形脉冲信号作为激励信号;②采集接收电路处理后的回波信号,并将回波数据传输到控制器上并存储。

#### (5) LabVIEW 软件平台

在本系统中,采用 LabVIEW 8.6 软件平台并完成以下内容:①设计超声测距系统整体时序流程和控制逻辑;②对回波信号进行分析和处理,实现测距算法;③开发显示界面,实时展示测量波形和数据。

作为整个超声波测距系统的核心,测距算法对测距结果的稳定性和准确度起到关键性作用。在 NI PXI 系列设备和 LabVIEW 等软件平台的能力支持下,超声测距系统在数字信号处理方法上有较大的选择空间。本文以互相关法为核心,重点研究合适的超声测距算法框架。

## 2 超声回波测距算法

### 2.1 超声测距原理

超声波测距中最常用的方式是脉冲回波法<sup>[3]</sup>,该方法利用的是超声波的反射性质。超声换能器朝周围环境发射超声波信号,同时开始接收遇障后返回的回波信号,通过检测超声波在空气中传播的渡越时间(Time-of-Flight,ToF),从而计算出换能器和障碍物之间的距离。距离计算公式为:

$$d = \frac{v \times \text{ToF}}{2} \quad (1)$$

其中  $v$  是超声波于空气中的传播速度,ToF 是渡越时间。超声波在空气中传播的速度受到温度影响,具体关系为:

$$v \approx 331.45 + 0.607T \quad (2)$$

其中  $T$  为环境空气温度(°C)。在实际测距系统设计中需要考虑温度的影响,采用温度传感器对超声波声速进行补偿处理。

在超声波测距过程中,测距结果的精度主要取决于渡越时间的测量准确程度。常用的渡越时间检测方法主要有阈值检测法、互相关法、相位法等<sup>[4]</sup>。

### 2.2 互相关法 ToF 计算

传统阈值检测法将回波信号电压和固定阈值电压进行比较,把回波信号电压首次到达阈值电压的时刻记为回波到达时刻。阈值法只需要通过比较运算实现,具有简单、快捷的优点,但是也存在以下一些缺点<sup>[5]</sup>:①检测到的时刻并不是准确的回波前沿到达时刻,存在一定误差;②较远距离的目标回波信号电压幅值较小,难以检测;③抗噪声干扰能力弱。

相对于阈值检测法来说,互相关法具有更好的精确度和抗干扰能力。互相关法通过计算回波信号和标准参考信号之间的相似程度来估算渡越时间,即进行互相关运算<sup>[6]</sup>。这里参考信号一般选取和回波信号近似的超声发射信号。回波信号可以看成是发射信号的幅值和时延变化并叠加噪声后的结果,两者波形形状基本保持不变,具有很强的相关性。具体表示为:

$$y(t) = Kx(t - \text{ToF}) + n(t) \quad (3)$$

式中: $x(t)$ 是发射, $y(t)$ 是回波信号, $K$ 是幅值衰减系数,ToF 是

渡越时间, $n(t)$ 是噪声信号。

回波信号  $x(t)$  和发射信号  $y(t)$  的互相关函数可以表示为:

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt \quad (4)$$

将式(3)代入后可知:由于发射信号和大部分噪声信号基本不相关,互相关运算的结果中几乎不会引入噪声干扰导致的误差。当  $\tau = \text{ToF}$  时, $R_{xy}(\tau)$  会取到最大值,即计算互相关函数后,可以通过获取其峰值时刻来确定渡越时间。

由于经过测距系统采集后的回波信号是离散信号,离散化互相关函数为:

$$R_{xy}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n+m) \quad (5)$$

式中: $m$ 为回波信号采样点延迟数, $N$ 为信号序列长度。

得到互相关函数后找到峰值对应的采样点位置,根据采样时间间隔即可计算出渡越时间。

互相关法利用了互相关运算的特性和回波信号的全局信息,有着很好的精确度和抗干扰能力,能够适用于测距精度要求高以及低信噪比环境等场景。但同时,由式(5)可以看出互相关法的运算量较大,需要底层硬件有足够的数据采集和计算能力。

### 2.3 包络提取法优化

使用互相关法时,由于超声回波信号具有振荡特性,在互相关函数峰值附近会出现多个幅度近似的峰值,容易导致 ToF 估算误差。为了更加精确地找到相关函数峰值时刻,可以利用包络法提取互相关函数包络,并通过搜索该包络的极值点提高 ToF 测量精度<sup>[7]</sup>。本文采用 Hilbert 变换进行包络提取,对于连续时间

信号  $x(t)$ ,其 Hilbert 变换  $\hat{x}(t)$  为:

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau = x(t) * \frac{1}{\pi t} \quad (6)$$

求其频域特性为:

$$\hat{X}(w) = X(w)H(w) \quad (7)$$

$$H(w) = \begin{cases} -j & w \geq 0 \\ +j & w < 0 \end{cases} \quad (8)$$

可以看出 Hilbert 变换实际上是对信号正频率分量移相 $-90^\circ$ ,对信号负频率分量移相 $+90^\circ$ 。由原始信号和其 Hilbert 变换构成解析信号:

$$\hat{x}(t) = x(t) + j\hat{x}(t) = A(t)e^{j\varphi(t)} \quad (9)$$

式(9)中  $A(t)$  是  $x(t)$  的包络:

$$A(t) = \sqrt{x(t)^2 + \hat{x}(t)^2} \quad (10)$$

对于离散信号的 Hilbert 变换提取包络的具体做法:首先对信号  $x(n)$  进行快速傅里叶变换后,将正频率分量加倍,将负频率分量置零,再进行快速傅里叶反变换得到解析信号,最后对解析信号取模得到  $x(n)$  的包络。

### 2.4 测距算法框架

本文提出的超声测距算法框架和具体实现流程如图 4 所示。为了进一步提高回波信号的信噪比,除了前置的硬件滤波电路外,本文还使用了数字滤波器进行二次消噪处理,降低外部噪声的干扰,具体实现采用 LabVIEW 中“滤波器”函数并进行参数配置。随后进行互相关处运算,由于超声波发射信号获取困难,基于超声波信号的窄带性,本文使用 8 个 40 kHz 矩形脉冲波作为参考信号,采用 LabVIEW 中“互相关”函数得到参考信号和回波信号的互相关波形。为了解决窄带超声波的互相关函数在峰值处振荡的问题,采用 Hilbert 变换提取互相关函数包络,具体实现可以通过 LabVIEW 中“快速希尔伯特变换”函数。最后,通过搜索互相关函数包络的峰值时刻,得到回波信号和参考信号之间的时延时间,从而估算出 ToF 值。

(下转第 60 页)

由于许多情况下我们并没有条件进行实物调试,gazebo 仿真和 rviz 可视化工具,能够为我们的开发提供许多帮助。仿真需要用到 URDF 格式的机器人模型,URDF 是一种统一的机器人描述格式,使用 XML 语法编写,包括机器人的运动学、视觉、动力学和碰撞模型的信息<sup>[4]</sup>。Gazebo 能够模拟外部真实环境和传感器输入,rviz 显示采集到的传感器数据。仿真中完成验证的代码在现实中也能够达到差不多的效果,能够在团队合作时提高软件开发效率,图 3 为 rviz 可视化界面:

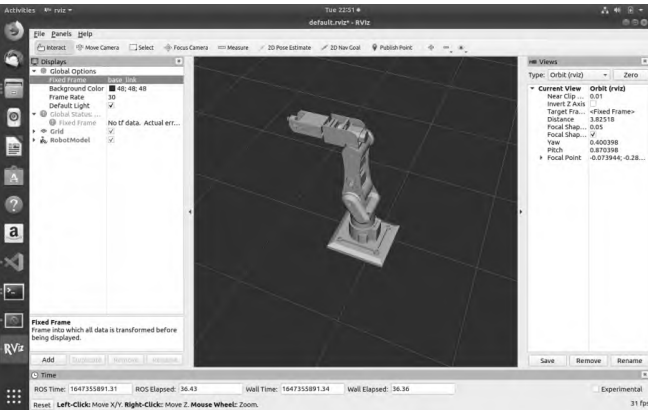


图 3 rviz 可视化界面

(上接第 58 页)

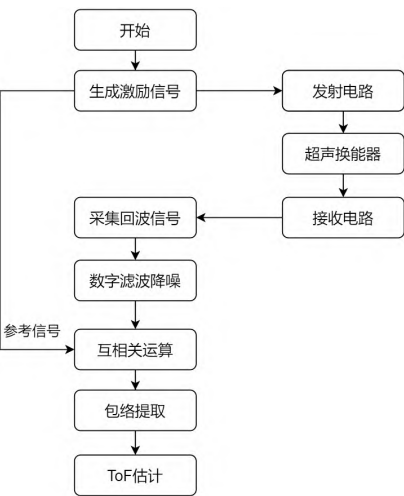


图 4 超声测距算法处理流程

3 实验和数据

对于本文的超声波测距系统,为了验证算法和平台的可行性,设计了如下的测距实验。实验中的目标障碍物为方形的平面纸板(60 cm×60 cm),置于空旷的场地后在 1 m、2 m、3 m 这 3 种不同距离下各进行连续 5 次重复实验。数据采集卡设置采样率为 800 kHz,使用 AIO、AI1 两个模拟输入通道通过差分方式采集回波信号,随后利用 LabVIEW 软件平台完成后续的处理流程,并计算测距结果。表 1 展示了不同距离的测距结果。

从实验结果可以看出,本文的测距算法最大误差在 5 mm 之内,平均误差控制在 0.3%之内,测距精度较高。产生误差的原因可能来源于多个方面,比如装置物理的固有偏差、信号传导时间、微弱的噪声干扰、设备时钟和同步等。总体来说,本文超声波测距系统和算法可以较为准确地完成测距,测距结果的误差和波动程度较低,有较好的准确度和稳定性。

3 结束语

本文针对现有智能垃圾分类系统方案的缺陷,进行基于深度学习和 ROS 的垃圾分类系统设计,协作机械臂和摄像头,能够分拣同时投入的多个种类的垃圾。此外,压缩装置与机械臂分拣的配合也具有一定的创新性,其能够使垃圾桶能够装载更多的垃圾,从而减少管理人员的工作量。在设计过程中,我们查阅了大量书籍作参考,进行机械建模和 ROS 仿真,以分析可能存在的问题,并且调试机械臂完成了目标的抓取和分拣,验证了本设计具有一定的合理性和实际应用价值。

参考文献

[1]蔡自兴.机器人学基础[M].北京:机械工业出版社,2015:15–17

[2]马兴录,何爱欣,李莹莹.桌面型机械臂的机器视觉应用框架研究[J].计算机与现代化,2019(11):64–68

[3]黄睿,陆许明,郭依林.基于 TensorFlow 深度学习手写体数字识别及应用[J].电子技术应用,2018,44(10):6–10

[4]Aaron Martinez,Enrique Fernández.ROS 机器人程序设计[M].刘品杰,译.北京:机械工业出版社,2014

[5]李建勇,刘雪梅,李雪霞,等.基于 ROS 的开源移动机器人系统设计[J].机电工程,2017,34(2):205–208

[6]Wyatt Newman.ROS 机器人编程:原理和应用[M].李笔锋,祝朝政,刘锦涛,译.北京:机械工业出版社,2019

[收稿日期:2022-03-16]

表 1 不同距离的测距结果(单位:mm)

距离	1000	2000	3000
测量结果 1	1002.7	2004.5	3003.6
测量结果 2	1003.1	2004.2	3003.7
测量结果 3	1001.9	2003.8	3004.9
测量结果 4	1002.3	2003.6	3004.1
测量结果 5	1002.5	2004.8	3004.3
平均误差	2.5	4.2	4.3
标准差	0.4	0.4	0.4

4 结束语

本文基于 NI PXI 数据采集设备和 LabVIEW 软件设计超声测距系统,通过硬件电路和数据采集卡实现超声波的发射、接收和采集功能,在 LabVIEW 软件平台上实现信号分析、测距运算、数据显示等功能。重点从数字信号处理方法上研究了超声信号渡越时间 ToF 的测量算法,并在 LabVIEW 软件上进行实现。通过测距实验对系统的测距效果进行分析,实验结果表明,本文超声波测距系统具有良好的准确性和稳定性,适用于对测量精度和抗干扰能力要求较高的应用场景。

参考文献

[1]李戈,孟祥杰,王晓华,等.国内超声波测距研究应用现状[J].测绘科学,2011,36(4):60–62

[2]朱宁.基于数字信号处理的超声波测距定位方法研究[D].南京:东南大学,2020

[3]李泽,姜明顺,吕珊珊,等.高精度超声波液位测量系统设计[J].自动化仪表,2018,39(11):56–59

[4]张海鹰,高艳丽.超声波测距技术研究[J].仪表技术,2011(9):58–60

[5]寇雪芹,谷立臣,闫小乐,等.基于虚拟仪器的超声信号测量及测距研究[J].计算机工程与应用,2012,48(6):17–20

[6]朱义德,杨瑞峰,郭晨霞,等.自具补偿互相关超声测距系统设计[J].仪表技术与传感器,2021(4):85–88,121

[7]付巍,朱岩.基于 Hilbert 变换的电压瞬变信号包络提取算法[J].计量学报,2013(1):49–52

[收稿日期:2022-02-25]