

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107655

超声定位中测距角度引入误差的补偿方法*

吕迎春, 田建艳, 陈燕, 乔晓杰, 吴海超

(太原理工大学电气与动力工程学院 太原 030024)

摘要:为了解决超声测距角度引入的误差难以有效补偿的问题,基于函数逼近理论和方法,提出了一种超声测距角度引入误差的补偿方法。首先对超声脉冲的传播和入射过程进行了仿真,仿真结果说明不同测距角度下的超声脉冲的传播速度不同,成为引入误差的媒介。然后通过实验分析了此媒介作用下的测距角度与误差的相关关系,采用基函数模型组合的方法构建了超声测距角误差模型。最后,针对模型自变量(测量距离和测距角度)必须是已知值,不能在实际中实现误差补偿的问题,将测距的测量值作为迭代运算的变量,将模型作为迭代运算的关系式,设计了一种超声测距角度引入误差的补偿算法。经实测验证,该算法在测距角度变化时,可以使测距误差的均值小于1.1 mm,有效地补偿了测距角度引入的误差,提高了超声定位的精度。

关键词: 超声测距;测距角度;误差模型;误差补偿;超声定位

中图分类号: TN911.72 TH712 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

Compensation method of the error caused by ranging angle in ultrasonic positioning

Lyu Yingchun, Tian Jianyan, Chen Yan, Qiao Xiaojie, Wu Haichao

(College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to solve the problem that it is difficult to effectively compensate the error caused by the angle in ultrasonic ranging, based on the theory and method of function approximation, a compensation method of the error caused by the angle in ultrasonic ranging is proposed. Firstly, the propagation and incidence process of ultrasonic pulse are simulated. The simulation results show that the propagation speed of ultrasonic pulse is different under different ranging angles, which becomes the medium of error introduction. Then, the correlation relationship between the ranging angle and the error under the action of this medium is analyzed through experiments, the basis function model combination method is used to construct the ultrasonic ranging angle error model. Finally, aiming at the problem that the model independent variables (measured distance and ranging angle) must be known values, and error compensation cannot be achieved in practice, the measured value of ranging is taken as the variable of the iterative calculation, the model is taken as the relational expression of the iterative calculation, and a compensation algorithm of the error caused by the ultrasonic ranging angle is designed. The actual measurement verifies that the algorithm can make the average value of the ranging error less than 1.1 mm when the ranging angle changes, which effectively compensates the error caused by the ranging angle and improves the accuracy of ultrasonic positioning.

Keywords: ultrasonic ranging; ranging angle; error model; error compensation; ultrasound positioning

0 引言

基于超声测距的定位技术在诸多领域得到了广泛研究。特别是近年来,将超声定位技术应用于动物的行为

和疾病预警研究,因比其他技术更具有优越性,而引起了广泛关注。动物行为判断的准确性,主要决定于超声定位的精度。目前,制约超声定位精度提高的主要原因之一,是超声换能器测距角度变化引入的误差难以实现有效补偿。

收稿日期:2021-03-24 Received Date:2021-03-24

* 基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1405902)、国家高技术研究发展计划863计划(2013AA102306)项目资助

研究中发现,当超声换能器的测距角度变化时,与噪声影响一样,会使超声波的波形发生畸变^[1]。基于超声测距的定位技术,其测距是依据超声波的传播时间。而波形发生畸变,造成了超声回波到达时间的识别困难。所以长期以来一直认为,波形畸变时的超声回波到达时间的识别误差是测距误差的主要来源之一。因此,为寻找满意的波形畸变时的超声回波到达时间识别方法,付出了大量研究。如卜英勇等^[2]提出了基于小波包络原理的峰值检测方法,克服了超声回波波形起伏造成的误差;陈建等^[3]采用动态阈值法,克服了固定门限电平受信号幅度影响的缺点;张从鹏等^[4]基于互相关法,提出了一种精确定位超声波回波位置的算法,有效地提高了超声传播时间的测量精度;燕学智等^[5]提出了时间基准和数字增益补偿的方法, Lu 等^[6]提出了基于短时傅里叶变换的超声传播时间估计方法,这些方法在一定程度上提高了超声传播时间的估算精度。

应用中发现,当超声换能器的测距角度不变时,上述方法很大程度地提高了超声测距的精度。但是,当超声换能器的测距角度变化时,上述的各种方法,仍然会出现较大的测量误差^[7-8]。针对上述问题,本文把测距角度引入的误差与超声脉冲信号的传播特性相联系,利用研发的仪器分析了测距角度与其引入的误差之间的相关关系,提出了一种超声测距角度引入误差的有效补偿方法。

1 问题及原因分析

1.1 问题

图1是课题组“畜禽异常行为超声定位监测方法”项目中,对猪进行定位的示意图,通过定位跟踪识别患病的猪,并进行预警。

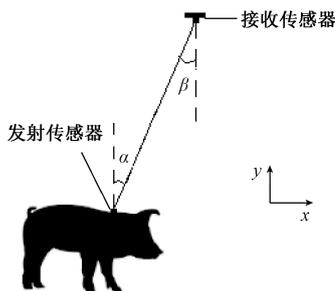


图1 猪的定位示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the positioning of a pig

患病的猪行走时身体左右晃动,形成了与健康猪不同的行走轨迹。超声疾病预警,就是根据患病猪与健康猪的行走轨迹不同,进行识别的。猪患病症状明显时,身体左右晃动的幅度一般在10~20 mm。这要求超声定位系统能够识别出10~20 mm的位置变化,并根据其摇晃

行走的轨迹进行预警。但是,由于测距角度引入的误差难以实现有效补偿,使得超声定位系统难以捕捉10~20 mm的位置变化。

由图1可知,测距的超声波射线与换能器的轴线呈现一定的角度,此角度便是本文定义的测距角度(即图1中的 $\angle\alpha = \angle\beta =$ 测距角度)。当猪行走时,测距角度随测量距离的变化而变化,其引入的测距误差制约着超声定位精度的提高,成为超声疾病预警研究中急需解决的问题。

1.2 测距角度引入误差的原因分析

采用COMSOL软件,通过仿真分析测距角度引入误差的原因。

1) 超声脉冲传播特性仿真

设计本仿真的目的,是观测同一脉冲信号沿不同方向传播时的特性,分析测距角度引入误差的原因。图2表示的是超声换能器发射出一脉冲信号,仿真设置的超声脉冲的传播距离为2500 mm。图3表示的是图2发射的脉冲信号沿不同测距角度方向传播的特性。由于篇幅有限,本文只给出了测距角度为0°和60°方向的超声脉冲传播特性的仿真。在图3的右上方,系统给出了超声脉冲到达图中位置时的传播时间。可以看到,同一脉冲信号,当处于不同测距角度方向时,虽然传播的距离相同,但所用的时间并不相同,传播时间随测距角度的增大而延长。

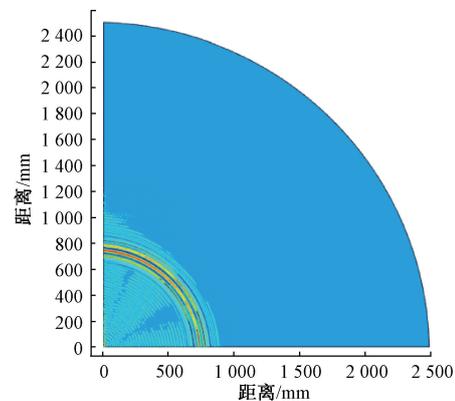


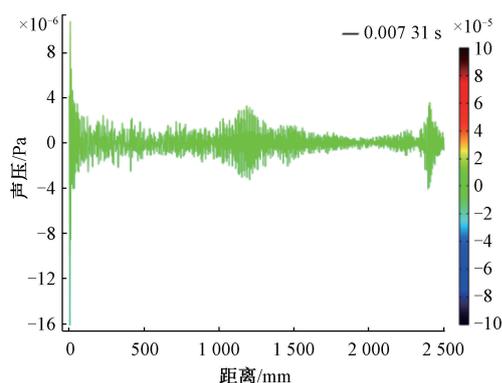
图2 超声脉冲声场

Fig. 2 Ultrasonic pulse sound field

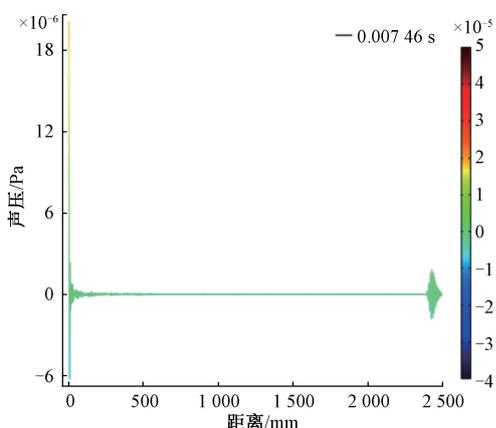
由图3也可以看到,不同测距角度方向的超声脉冲信号的波形是有差异的。波形不同,介质弹性变形的形式不同,声速也会不一样^[9]。

2) 超声脉冲入射过程仿真

图4不同测距角度的超声脉冲入射接收换能器的仿真。图4中不同的曲线表示不同测距角度的超声脉冲传播相同距离后,作用于接收换能器时输出的电压曲线。由图4可知,电压曲线的峰值时刻不同。这是由于不同



(a) 角度为0°时的传播特性
(a) Propagation characteristics at 0° angle



(b) 角度为60°时的传播特性
(b) Propagation characteristics at 60° angle

图3 不同测距角度方向的超声脉冲的传播特性

Fig. 3 Propagation characteristics of ultrasonic pulses in different ranging angle directions

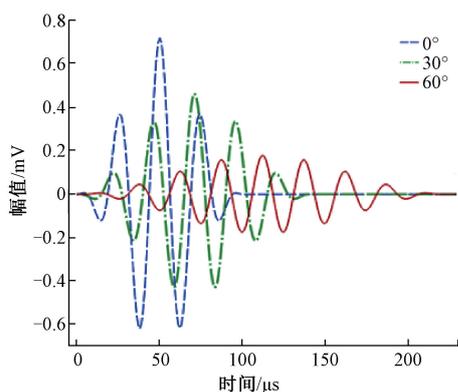


图4 不同测距角度的超声脉冲信号的峰值时刻

Fig. 4 Peak time of ultrasonic pulse at different ranging angles

测距角度的超声脉冲作用于接收换能器的时刻不同引起的。

图4中不同测距角度的电压曲线起伏程度不同的现象,可用式(1)表示。

$$f(t) = Ae^{-K(t-\tau)^2} \cos(2\pi f_0(t-\tau)) \quad (1)$$

式(1)是目前普遍采用的一种超声回波信号的数学模型^[10-11]。式中: A 为超声脉冲的幅值; K 为带宽因子; τ 是超声脉冲的传播时间; f_0 是超声脉冲的中心频率。

用式(1)表示入射接收换能器的超声脉冲信号,那么接收换能器受到的作用力为 $f(t)$,而使接收换能器产生压电效应的有效力为: $f(t) \cdot \cos\beta$, β 为超声脉冲的入射角。 $f(t) \cdot \cos\beta$ 随 β 的增大而减小。

3) 仿真结论

本仿真说明,发射换能器的测距角度变化引起了超声脉冲传播速度的变化,从而引入了测距误差,并且误差随测距角度的增大而增大。

2 测距角度与误差的相关性分析

根据仿真结论,可以把图1的问题抽象成测距角度与其引入的误差的相关性问题,可用本文研制的仪器如图5所示,完成相关分析。

2.1 实验设备

图5仪器主要由超声发射传感器、超声接收传感器、角度定位器、支撑杆及主机组成。发射和接收传感器由超声换能器和相应电路组成;角度定位器用于控制超声换能器的测距角度,由量角器、定位指针及角度定位轴组成。支撑杆采用套管结构,发射与接收传感器的距离可以通过升缩内套管进行调整,可以实现0.4~3 m距离的测量。超声脉冲信号的发射和接收由主机控制,接收传感器将接收到的回波信号传送给主机,主机用LabVIEW软件先对接收到的信号进行滤波处理,然后依据文献[4]的方法计算超声波的传播时间。



图5 实验设备

Fig. 5 Experiment equipment

2.2 实验方法

课题组在对猪进行定位跟踪时,是将若干个接收传感器安装在距地面一定高度的固定位置上,发射传感器的安装如图 1 所示。根据猪场安装接收传感器的高度和超声场覆盖范围计算的发射与接收换能器的距离变化范围为 1 000~2 500 mm。因此,本文只分析上述距离范围内,测距角度与误差的相关关系。利用图 5 仪器进行了以下实验:

1) 实验目的: 观测超声发射换能器的测距角度与其引入的误差的相关关系。

2) 实验方法: 将接收传感器安装在仪器的支撑横杆上,发射传感器安装在角度定位轴上,并使发射换能器与接收换能器的轴线在同一条直线上。此时,发射和接收换能器的测距角度均为 0°,如图 5 所示。然后调节支撑杆,使发射与接收换能器之间的距离分别为 1 000、1 500、2 000 和 2 500 mm,并分别测量这些距离的不同测距角度时的超声传播时间。其方法是:保持接收换能器不动,操作角度定位器,使发射换能器绕角度定位轴转动到某一角度,然后测量这一测距角度时的超声波的传播时间 t 。测距角度从 0°开始测量,每变化 2°进行一次测量,重复测量多次,舍去最大值和最小值后取均值作为测量值。

为了使获得误差的比较基准具有可信度,将上述的时间测量值 t 按照式(2)转换成距离测量值 L' ,然后将此值与实际距离 L 相比较,得到不同测距角度时的误差值。

$$L' = (331.45 + 0.61T)t \quad (2)$$

式中: T 是由 DS18B20 传感器测量的超声传播介质的摄氏温度。由此可知,DS18B20 传感器和式(2)构成了本文仪器的温度补偿系统。

最后,对测试得到的不同测距角度的误差值按照式(3)作归一化处理,得到图 6 所示的测量结果。

$$\Delta L_i = \frac{\Delta S_i - \min}{\max - \min} \quad (3)$$

式中: ΔL_i 为归一化处理后的误差值; ΔS_i 为误差的测量值, $i = 1, 2, \dots, n$; \min 和 \max 分别为误差测量值中的最小值和最大值。

2.3 测距角度与误差的相关关系

图 6 是根据实验数据绘制的散点图。由图 6 可知对于确定的距离,测距角度引入的误差随测距角度的增大而增大,当测量距离变化时,测距角度误差曲线也随之变化。

为了揭示测距角度与其引入的误差之间的相关关系,假设图 6 中不同距离 $L_j (j = 1, 2, 3, 4)$ 观测的样本数据 $(\Delta L_i, \alpha_i)_{L_j}$ 均满足式(4)的非线性概率模型。

$$\Delta L_i = m e^{n\alpha_i} + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (4)$$

式中: α 为测距角度; ΔL 为测距角度引入的误差, m 和 n 为待估计参数; ε 表示除测距角度以外其它因素产生的随机误差,并满足式(5)的独立同分布假设。

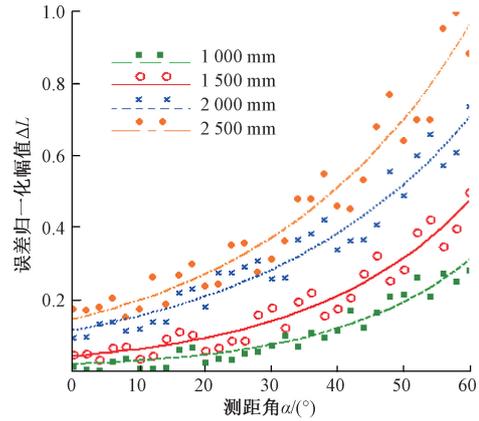


图 6 测量数据散点图

Fig. 6 Scatter plot of measurement data

$$\begin{cases} E(\varepsilon_i) = 0, & i = 1, 2, \dots, k \\ cov(\varepsilon_i, \varepsilon_l) = \begin{cases} \sigma^2, & i = l, i, l = 1, 2, \dots, k \\ 0, & i \neq l \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

对式(4)两端求条件期望,得:

$$E(\Delta L_i) = m e^{n\alpha_i} \quad (6)$$

式(6)从平均意义上表达了误差 ΔL 与测距角度 α 的统计规律。根据图 6 的样本数据 $(\Delta L_i, \alpha_i)_{L_j}$ 利用 LabVIEW 提供的 Exponential Fit. vi, 对式(6)进行参数估计。在 Exponential Fit. vi 的“方法”输入项中,选择“最小二乘法”。表 1 给出了 Exponential Fit. vi 的运算结果。

表 1 不同距离的指数回归方程

Table 1 Exponential regression equations for different distances

回归方程	测量距离 L/mm
$\hat{\Delta L} = 0.016778e^{0.0485065a}$	1 000
$\hat{\Delta L} = 0.039439e^{0.0414386a}$	1 500
$\hat{\Delta L} = 0.011882e^{0.0306854a}$	2 000
$\hat{\Delta L} = 0.042215e^{0.0318809a}$	2 500

按照上述方法,也建立了与图 6 散点图走势较为吻合的其他基函数的最小二乘回归方程,如表 2 和 3 所示。

表 2 不同距离的多项式回归方程

Table 2 Polynomial regression equations for different distances

回归方程	测量距离 L/mm
$\hat{\Delta L} = 0.0144725 - 8.30707 \times 10^{-4}a + 9.04762 \times 10^{-5}a^2$	1 000
$\hat{\Delta L} = 0.0527967 - 1.20602 \times 10^{-3}a + 1.31621 \times 10^{-4}a^2$	1 500
$\hat{\Delta L} = 0.0997937 + 2.98742 \times 10^{-3}a + 1.10558 \times 10^{-4}a^2$	2 000
$\hat{\Delta L} = 0.17918 - 6.10631 \times 10^{-4}a + 2.23937 \times 10^{-4}a^2$	2 500

表3 不同距离的线性回归方程

Table 3 Linear regression equations for different distances

回归方程	测量距离 L/mm
$\widehat{\Delta L} = 4.59786 \times 10^{-3}a - 0.0380036$	1 000
$\widehat{\Delta L} = 6.69123 \times 10^{-3}a - 0.0235433$	1 500
$\widehat{\Delta L} = 9.62089 \times 10^{-3}a + 0.0356702$	2 000
$\widehat{\Delta L} = 0.0128256a + 0.0492964$	2 500

表4是LabVIEW给出的上述3种回归方程的评价指标。

表4 回归方程拟合优度评价

Table 4 Evaluation of goodness of fit of regression equations

评价指标	回归方程			测量距离 L/mm
	指数	线性	多项式	
R^2	0.9368	0.8644	0.9483	1 000
	0.9356	0.8515	0.9345	1 500
	0.9418	0.9113	0.9406	2 000
	0.9409	0.8742	0.9412	2 500
SSE	0.0154	0.0331	0.0133	1 000
	0.0334	0.0776	0.0337	1 500
	0.0576	0.0894	0.0585	2 000
	0.1087	0.2349	0.1083	2 500

R^2 和SSE是目前文献普遍采用的回归方程拟合优度的评价指标,其定义如下:

$$SSE = \sum_{i=1}^k (\Delta L_i - \widehat{\Delta L}_i)^2, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{\sum_{i=1}^k (\Delta L_i - \overline{\Delta L})^2}, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (8)$$

式中: ΔL_i 为测量值; $\widehat{\Delta L}_i$ 为回归方程估计值; $\overline{\Delta L}$ 是测量值的均值。文献[12]参考国内外情况,根据 R^2 的取值将回归方程的拟合效果划分为4个等级,如表5所示。

表5 回归方程拟合效果的等级划分

Table 5 Grade division of fitting effect of regression equation

R^2	1 ~ 0.9	0.9 ~ 0.8	0.8 ~ 0.6	< 0.6
拟合效果	优	良	中	劣

根据表5的评价标准,测距角度与其引入的误差遵循指数、线性和多项式回归方程给定的约束关系。

3 误差与测距角度关系建模

为了实现测距角度与其引入的误差之间的定量计算,在上述研究的基础上构建误差与测距角度关系的数学模型。

3.1 加权组合模型的设计方法

1) 模型设计

已有的研究证明,组合模型可以使单项基函数模型的信息实现互补,减少模型的不确定性,提高模型的估计精度^[13-14]。用基函数模型构建组合模型,由于基函数模型在组合模型中的贡献存在差异,故本文采用加权的方法构建组合模型。

首先用最小二乘法估计参数,得到与图6散点图走势基本吻合的 p 个单项基函数模型,如式(9)所示。

$$\widehat{\Delta L}_j(a_t), \quad j = 1, 2, \dots, p, \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

然后通过加权构造组合函数模型:

$$\widehat{\Delta L}_{com}(a_t) = \sum_{j=1}^p \omega_j \widehat{\Delta L}_j(a_t) = \omega_1 \widehat{\Delta L}_1(a_t) + \omega_2 \widehat{\Delta L}_2(a_t) + \dots + \omega_p \widehat{\Delta L}_p(a_t) \quad (10)$$

式中: ω_j 是权重系数,其约束条件是:

$$\sum_{j=1}^p \omega_j = 1, \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (11)$$

已有研究证明,允许权重取负值的模型的估计精度,要比约束权重为非负时高^[15-16]。以提高模型估计精度为目的,本文对权重系数没有进行非负约束。

2) 权系数估计

令式(10)中 $y_t = \widehat{\Delta L}_{com}(a_t)$, $x_{ij} = \widehat{\Delta L}_j(a_t)$, 则式(10)可表示成如下形式:

$$y_t = \sum_{j=1}^p \omega_j x_{ij} = \omega_1 x_{t1} + \omega_2 x_{t2} + \dots + \omega_p x_{tp} \quad (12)$$

式中: y_t 为 t 时刻组合模型的估计值; ω_j 为第 j 个基函数模型的权系数; x_{ij} 为 t 时刻第 j 个基函数模型的估计值。将式(12)写成矩阵形式为:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\omega} \quad (13)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1p} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2p} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{np} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_p \end{bmatrix} \quad (14)$$

使离差平方和最小对式(13)进行参数估计,则

$$Q(\hat{\omega}_1, \hat{\omega}_2, \dots, \hat{\omega}_p) = \min \sum_{t=1}^n (y_t - \omega_1 x_{t1} - \omega_2 x_{t2} - \dots - \omega_p x_{tp})^2 \quad (15)$$

从式(15)求解 $\hat{\omega}_1, \hat{\omega}_2, \dots, \hat{\omega}_p$ 是一个求极值的问题,由于 Q 是关于 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_p$ 的非负二次函数,因此它的最小值总是存在的。根据微积分中求极值的原理, $\hat{\omega}_1, \hat{\omega}_2, \dots, \hat{\omega}_p$ 应满足式(16)所示方程组:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial Q}{\partial \omega_1} \right|_{\omega_1 = \hat{\omega}_1} = -2 \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{\omega}_1 x_{t1} - \hat{\omega}_2 x_{t2} - \dots - \hat{\omega}_p x_{tp}) x_{t1} = 0 \\ \left. \frac{\partial Q}{\partial \omega_2} \right|_{\omega_2 = \hat{\omega}_2} = -2 \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{\omega}_1 x_{t1} - \hat{\omega}_2 x_{t2} - \dots - \hat{\omega}_p x_{tp}) x_{t2} = 0 \\ \dots \\ \left. \frac{\partial Q}{\partial \omega_p} \right|_{\omega_p = \hat{\omega}_p} = -2 \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{\omega}_1 x_{t1} - \hat{\omega}_2 x_{t2} - \dots - \hat{\omega}_p x_{tp}) x_{tp} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

将以上方程组整理后,得到用矩阵形式表示的正规方程组:

$$X'(y - X\hat{\omega}) = 0 \quad (17)$$

将式(17)移项得:

$$X'X\hat{\omega} = X'y$$

当 $(X'X)^{-1}$ 存在时,即得到权系数的最小二乘估计:

$$\hat{\omega} = (X'X)^{-1}X'y \quad (18)$$

3.2 建 模

如前所述,表 1~3 的回归方程是从基函数群中筛选出的基函数模型,测距角度与其引入的误差符合此基函数模型给定的制约关系。因此,本文选用表 1~3 的回归方程,按照上述方法构建组合的测距角误差模型。

实验中,测距角度 a 从 0° 开始,每变化 2° 进行一次测量,且 $0^\circ \leq a \leq 60^\circ$ 。令式(9)中 $p = 3$,则构建的组合模型为:

$$\hat{\Delta L}_{com}(a_t) = \sum_{j=1}^3 \omega_j \hat{\Delta L}_j(a_t), j = 1, 2, 3, t = 1, 2, 3, \dots, 31 \quad (19)$$

式中: $\hat{\Delta L}_1(a_t)$ 、 $\hat{\Delta L}_2(a_t)$ 和 $\hat{\Delta L}_3(a_t)$ 分别为指数、线性和多项式模型。然后,根据表 1~3 的不同距离的基函数模型及式(18),可求得式(19)的权系数如表 6 所示。

表 6 组合模型中不同基函数模型的权系数

Table 6 Weight coefficients of different basis function models in combination model

函数类型	指数	线性	多项式	测量距离 L/mm
权系数	-0.112 033	-0.011 746 9	1.122 74	1 000
	0.644 214	0.001 232 9	0.354 907	1 500
	1.496 030	0.415 162 0	-0.907 583	2 000
	0.652 733	-0.066 298 7	0.412 661	2 500

将表 6 的权系数和相应的单项基函数模型带入式(19),可得到不同测量距离的组合模型,如表 7 所示。表 8 是对模型组合效果的评价。将表 8 与表 4 对比可看到:同一测量距离的 $R_{com}^2 > \max\{R_1^2, R_2^2, R_3^2\}$, $SSE_{com} < \min\{SSE_1, SSE_2, SSE_3\}$ 。 R_{com}^2 和 SSE_{com} 是组合模型的评价指标, R_1^2, R_2^2, R_3^2 和 SSE_1, SSE_2, SSE_3 分别是表 4 中指数、线性和多项式模型的评价指标。为了实现任意距离的测距角度误差估计,将表 7 中不同距离的组合模型,用一个一般式表示:

$$\hat{L}_{com} = Ae^{Ba} + C + Da + Ea^2 \quad (20)$$

式(20)即为任意距离的测距角误差模型。式中: $\hat{\Delta L}_{com}$ 为测距误差; a 为测距角度; A, B, C, D 和 E 为参数。利用式(20)可以求得任意距离的测距角度引入的误差。

表 7 不同测量距离的组合模型

Table 7 Combination model for different measurement distances

	组合模型	测量距离 L/mm
$\hat{\Delta L}_{com} =$	$-1.88 \times 10^{-3} e^{4.851 \times 10^{-2} a} + 1.67 \times 10^{-2} - 9.867 \times 10^{-4} a + 1.016 \times 10^{-4} a^2$	1 000
	$2.541 \times 10^{-2} e^{4.144 \times 10^{-2} a} + 1.871 \times 10^{-2} - 4.198 \times 10^{-4} a + 4.671 \times 10^{-5} a^2$	1 500
	$0.167 4 e^{3.069 \times 10^{-2} a} - 7.576 \times 10^{-2} + 1.283 \times 10^{-3} a - 1.003 \times 10^{-4} a^2$	2 000
	$9.283 \times 10^{-2} e^{3.188 \times 10^{-2} a} + 7.067 \times 10^{-2} - 1.102 \times 10^{-3} a + 9.241 \times 10^{-5} a^2$	2 500

表 8 组合模型优度评价

Table 8 Evaluation of the goodness of the combination model

测量距离 L/mm		1 000	1 500	2 000	25 000
评价 指标	R^2	0.952 3	0.938 2	0.946 7	0.943 8
	SSE	0.011 6	0.032 5	0.054 6	0.105 2

3.3 模型的参数估计

式(20)中, A, B, C, D 和 E 为未知参数,因此需要给出参数的估计方法。由表 7 可知,式(20)中参数 A, B, C, D 和 E 的取值随测量距离 L 的变化而变化,因而可以建立与 L 的关系式。实际中, L 在区间 $[1 000, 2 500]$ (单位:mm) 上是连续的,对于 L 在区间 $[1 000, 2 500]$ 上的每一个取值,参数 A, B, C, D 和 E 总分别有一个值与之对

应,因此可知 A 、 B 、 C 、 D 和 E 表示的是 5 个与 L 取值有关的连续函数,且在区间 $[1\ 000, 2\ 500]$ 上有定义,设这 5 个函数分别为:

$$A = f(L), B = \varphi(L), C = \psi(L), D = g(L), E = Q(L) \quad (21)$$

已知 $A = f(L)$ 在 L 值为 1 000、1 500、2 000 和 2 500 mm 时的函数值分别为 -1.88×10^{-3} 、 2.541×10^{-2} 、 0.1674 和 9.283×10^{-2} ;但并不知道这个函数的表达式。以点 1 000、1 500、2 000 和 2 500 为插值节点,通过 Lagrange 插值算法建立了一个三次多项式:

$$\mathcal{A}(L) = 1.612\ 68 - 3.389\ 84 \times 10^{-3}L + 2.216\ 96 \times 10^{-6}L^2 - 4.416\ 8 \times 10^{-10}L^3 \quad (22)$$

式(22)符合 $\mathcal{A}(1\ 000) = -1.88 \times 10^{-3}$, $\mathcal{A}(1\ 500) = 2.541 \times 10^{-2}$, $\mathcal{A}(2\ 000) = 0.1674$, $\mathcal{A}(2\ 500) = 9.283 \times 10^{-2}$ 。所以,式(22)是函数 $A = f(L)$ 的近似表达式,可以利用式(22)求解函数 $A = f(L)$ 的估计值。同理,通过 Lagrange 插值算法也可以得到式(21)中其他函数的近似表达式:

$$\mathcal{B}(L) = -1.087 \times 10^{-2} + 1.396\ 33 \times 10^{-4}L - 1.010\ 8 \times 10^{-7}L^2 + 2.082\ 67 \times 10^{-11}L^3 \quad (23)$$

$$\mathcal{C}(L) = -1.626\ 28 + 3.41 \times 10^{-3}L - 2.217\ 24 \times 10^{-6}L^2 + 4.498\ 4 \times 10^{-10}L^3 \quad (24)$$

$$\mathcal{D}(L) = 2.218\ 2 \times 10^{-2} - 4.981\ 78 \times 10^{-5}L + 3.361\ 4 \times 10^{-8}L^2 - 6.964\ 93 \times 10^{-12}L^3 \quad (25)$$

$$\mathcal{F}(L) = -1.792 \times 10^{-3} + 4.093\ 43 \times 10^{-6}L - 2.775\ 28 \times 10^{-9}L^2 + 5.757\ 87 \times 10^{-13}L^3 \quad (26)$$

3.4 模型误差分析

将模型的估计值与实测值进行了对比分析,发现 $1\ 240\ \text{mm} < L < 1\ 260\ \text{mm}$ 时,模型存在系统误差,故进行了修正。修正后的模型可以较高精确地估计 780 ~ 2 600 mm 距离内任一距离的测距角度引入的误差。图 7 是不同测距角度的模型估计值与实测值比较后的偏差。实测值由本文的仪器获得。

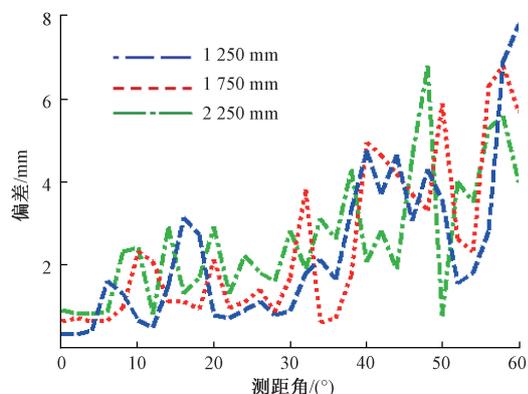


图 7 不同测距角度的偏差

Fig. 7 Deviation for different ranging angles

根据模型参数与测量距离的相关关系,本文采用 Lagrange 插值算法进行了参数估计。根据对 Lagrange 插值函数的分析可知,远离插值节点的函数值的误差较大,因而对于任何距离 L 的模型误差 $R(L)$,都满足 $R(L) \leq R(L_i)$, $i=0,1,2$ 。 $L_0 = 1\ 250\ \text{mm}$, $L_1 = 1\ 750\ \text{mm}$, $L_2 = 2\ 250\ \text{mm}$, $L \in [1\ 000, 2\ 500]$ (单位:mm)。故本文只对测量距离 L 为 1 250、1 750 和 2 250 mm 的模型误差进行了分析。表 9 给出了图 7 偏差的最大值和均值。

表 9 最大偏差和平均偏差

Table 9 Maximum deviation and average deviation mm		
测量距离	最大偏差	平均偏差
1 250	7.78	2.29
1 750	6.71	2.46
2 250	6.84	2.62

4 测距角度引入误差的补偿算法

利用测距角误差模型估计误差时,需要知道测量距离和测距角度,但实际定位中,测距角度和测量距离是未知的。因此,本文的测距角误差模型不能直接用于超声定位中的误差补偿。针对此问题,将超声定位中获取的距离测量值作为迭代运算的变量,将测距角误差模型作为迭代运算的关系式,提出了一种超声测距角度引入误差的补偿算法。

4.1 补偿算法

图 8 中, s 为发射换能器与接收换能器在 y 方向的距离, α 为实际的测距角度, L 是发射换能器与接收换能器的实际距离。如果把 α 与 L 带入测距角误差模型,就可以求出发射换能器与接收换能器的距离为 L 时测距角 α 引入的误差 ΔL (如图 8 所示)。由于已进行了降噪处理和温度补偿,所以实际距离为:

$$L \approx L' - \Delta L \quad (27)$$

式中: L' 为距离测量值。按照式(27)的计算逻辑,将超声定位中的 L' 作为迭代运算的变量,将求解 ΔL 的测距角误差模型作为迭代运算的关系式,就可以使 L' 逼近 L 。由图 8 可知:

$$\alpha + \Delta\alpha = \arccos \frac{s}{L'} = \alpha' \quad (28)$$

补偿算法的原理是:1) 首先利用距离测量值 L' 按照式(28)求解测距角 α' 。实际中 s 是给定的已知值。2) α' 求解后,将 α' 和 L' 带入测距角误差模型,求解距离为 L' 时,测距角 α' 引入的误差 $\Delta L'$ 。3) 然后求解 $L' - \frac{1}{100}\Delta L'$ 的值,并将其值作为下一次迭代运算的初始值,按

照 1) ~ 3) 的顺序进行迭代运算, 通过迭代运算使测量值 L' 逼近实际距离 L 。迭代运算的终止条件是迭代次数 x , 迭代次数需根据具体应用, 由算法确定。

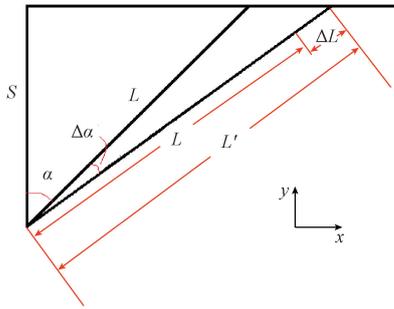


图 8 补偿算法原理图

Fig. 8 Principle diagram of the compensation algorithm

4.2 补偿算法的有效性分析

1) 测距精度分析

峰值法和互相关法是目前普遍采用的测距方法, 文献[7]给出了这两种方法在不同测距角度时的距离测量值, 与实际距离比较后得到误差, 如表 10 所示。

表 10 不同测距方法的测距角度误差
Table 10 Error caused by ranging angle of different ranging methods

实际距离/mm	测距角度/°	距离测量值/mm		测距误差/mm	
		峰值法	互相关法	峰值法	互相关法
795	0	795.89	801.26	0.89	6.26
	5	799.75	802.25	4.75	7.25
	10	802.34	806.54	7.34	11.54
	15	804.23	818.98	9.23	23.98

表 10 数据说明: 目前的测距方法不能补偿测距角度引入的误差。将表 10 的距离测量值输入本文补偿算法, 求解使算法估计值与实际距离的误差为最小的不同距离测量值的迭代次数, 然后分别建立表 10 中两种测距方法的距离测量值与迭代次数的回归模型, 由距离测量值估算本文补偿算法的迭代次数, 表 11 是本文算法对表 10 误差补偿后的效果。

表 11 对表 10 误差的补偿效果

Table 11 The compensation effect for the error in Table 10

实际距离/mm	测距角度/°	补偿后的误差/mm	
		峰值法	互相关法
795	0	0.13	0.43
	5	1.77	0.88
	10	1.46	2.21
	15	0.95	0.82

由表 11 可以看到, 本文算法可以有效地补偿测距角度引入的误差, 补偿后的误差均值小于 1.1 mm。而且本文的算法进一步提升了模型的补偿精度。

2) 补偿算法的定位效果

实验方法: 将若干个接收传感器安装在距地面 1 750 mm 处, 接收传感器之间的距离是按照超声场的覆盖范围计算的。发射传感器安装在一个移动物体上, 然后将移动物体依次放置在 10 个位置已知的点上, 进行定位分析。

本实验采用课题组“畜禽异常行为超声定位监测方法”项目中, 使用的无线超声定位系统。系统的测距分别采用峰值法、互相关法和经本文算法补偿的峰值法, 除此之外的温度补偿、除燥及定位均采用相同的算法。图 9 是系统给出的二维定位效果图。

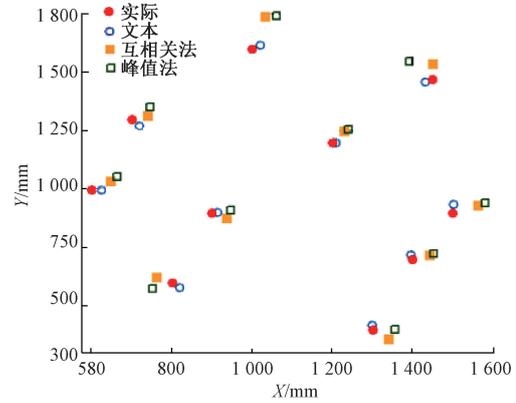


图 9 补偿算法的定位效果

Fig. 9 The positioning effect of the compensation algorithm

由图 9 可以看到, 经本文算法补偿后的定位效果要优于峰值法和互相关法。以定位算法确定的位置到对应已知位置的直线距离作为定位误差, 则上述 3 种方法的定位误差如表 12 所示。

表 12 超声定位误差

Table 12 Ultrasonic positioning error mm

误差	算法		
	本文	互相关法	峰值法
最大平均	32	113	125
	16	51	57

由表 12 的数据可知, 本文的补偿算法可以实现对猪的疾病预警。

5 结 论

针对测距角度引入的误差难以补偿的问题,通过对仿真和实验结果的分析,得出了以下结论:

1) 测距角度变化引起了超声脉冲传播速度的变化。而目前的测距方法在计算距离时,把超声脉冲的传播速度看成是不随测距角度变化的常数,因而引入了测距误差。

2) 本文构建的测距角误差模型,揭示了测距角度与误差的相关关系,为测距角度的误差补偿提出了一个新的思路。模型参数的估计方法,将以测距角度为自变量的一元非线性模型,转化为以测距角度和测量距离为自变量的二元非线性模型,使模型可以对不同测量距离的测距角度引入的误差进行有效估计,提升了模型的实用性。

3) 提出了一种测距角度引入误差的补偿算法,该算法只要迭代次数取得合适,就能很大程度地提高超声测距精度。因而,满意的迭代次数的计算方法成为进一步探讨的问题。

参考文献

- [1] 孙牵宇,童峰,许肖梅.一种大角度范围的高精度超声波测距处理方法[J].厦门大学学报(自然科学版),2006,45(4):513-517.
SUN Q Y, TONG F, XU X M. A high precision ultrasonic ranging method under misalignment of transducer pairs [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2006, 45(4): 513-517.
- [2] 卜英勇,何永强,赵海鸣,等.一种高精度超声波测距仪测量精度的研究[J].郑州大学学报(工学版),2006,27(1):86-90.
BO Y Y, HE Y Q, ZHAO H M, et al. Study on detection precision of the ultrasonic distance measurement device with high precision [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2006, 27(1): 86-90.
- [3] 陈建,孙晓颖,林琳,等.一种高精度超声波到达时刻的检测方法[J].仪器仪表学报,2012,33(11):2422-2428.
CHEN J, SUN X Y, LIN L, et al. Method to precisely measure arrival time of ultrasonic [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(11): 2422-2428.
- [4] 张从鹏,李弘,周邦平.基于互相关法的超声波高精度回波定位方法研究[J].机电工程,2019,36(8):830-834.
ZHANG C P, LI H, ZHOU B P. Precise ultrasonic distance measurement method based on cross-correlation algorithm [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019, 36(8): 830-834.
- [5] 燕学智,王海云,王晰.超声波飞行时间测量的数字增益补偿[J].仪器仪表学报,2018,39(9):82-90.
YAN X ZH, WANG H Y, WANG X. Digital gain compensation for ultrasonic flight time measurements [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(9): 82-90.
- [6] LU Z K, MA F H, YANG C, et al. A novel method for estimating time of flight of ultrasonic echoes through short-time fourier transforms [J]. Ultrasonics, 2020 (103): 106104.
- [7] 孔明,侯蕊,赵军.基于FPGA的超声波测距系统[J].仪表技术与传感器,2013,(6):86-89.
KONG M, HOU R, ZHAO J. Ultrasonic ranging system based on FPGA [J]. Instrument Technique and Sensor, 2013, (6): 86-89.
- [8] CAROTENUTO R, MERENDA M, IERO D, et al. Simulating signal aberration and ranging error for ultrasonic indoor positioning [J]. Sensors, 2020, 20, 3548.
- [9] 万升云.超声波检测技术及应用[M].北京:机械工业出版社,2017:10-11.
WAN SH Y. Ultrasonic testing technology and its application [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2017:10-11.
- [10] 周海鹏,韩赞东,都东,等.基于Gauss调制脉冲模型的超声信号提取算法[J].清华大学学报(自然科学版),2019,59(2):96-102.
ZHOU H P, HAN Z D, DOU D, et al. Ultrasonic signal extraction algorithm based on a Gaussian modulated pulse model [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2019, 59(2): 96-102.
- [11] 单泽彪,刘小松,鲁胜麟,等.基于双阵元超声波接收阵列的风矢量测量[J].仪器仪表学报,2021,42(2):228-234.
SHAN Z B, LIU X S, LU SH L, et al. Wind vector measurement using dual sensors ultrasonic receiving array [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 228-234.
- [12] 孙炯,梁锦强,刘凯.一种基于最小二乘法的广义加权组合预测模型[J].科技通报,2013,29(8):10-12.
SUN J, LIANG J Q, LIU K. A combined forecasting model based on optimal weighted method and east-squares method [J]. Bulletin of Science and Technology, 2013, 29(8): 10-12.
- [13] MUTHU KUMARAN A M J, RAMASAMY S. A

dynamically weighted discrete combination model for all releases of a software system [J]. *Microprocessors and Microsystems*, 79(2020), 103290.

- [14] WANG H Y, SHE H, XU J, et al. A three-point hyperbolic combination model for the settlement prediction of subgrade filled with construction and demolition waste [J]. *Materials*, 2020, 13(8), DOI: 10.3390/m01308159.
- [15] 殷春武. 加权残差平方和最小的组合预测组合权重的确定[J]. *统计与决策*, 2012, 354(6): 27-28.
YIN CH W. Determination of combination weight in combination forecasting with minimum sum of squares of weighted residuals [J]. *Statistics & Decision*, 2012, 354(6): 27-28.
- [16] 奚晨. 组合预测模型的应用与研究——以中国石油消费量预测为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
XI CH. Research and application on combined forecasting models: A case study on China's oil consumption [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.

作者简介



吕迎春, 2002年、2005年和2011年于太原理工大学分别获得学士、硕士和博士学位, 现为太原理工大学讲师。主要研究方向: 超声波定位技术; 超声波检测技术。
E-mail: xiaolv8853@126.com

Lyu Yingchun received her B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Taiyuan University of Technology in 2002, 2005 and 2011, respectively. She is currently a lecturer in Taiyuan University of Technology. Her main research direction includes ultrasonic positioning technology and ultrasonic detection technology.



田建艳(通信作者), 1988和1993年于太原工业大学分别获得学士学位和硕士学位, 2008年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为太原理工大学教授, 博士生导师。主要研究方向: 复杂系统建模与智能控制、智能机器人。
E-mail: tut_tianjy@163.com

Tian Jianyan (Corresponding author) received her B. Sc. and M. Sc. degrees both from Taiyuan University of Technology in 1988 and 1993, respectively, and received her Ph. D. degree in 2008 from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, China. Now, she is a professor and doctoral supervisor in Taiyuan University of Technology. Her main research interest includes complex system modeling and intelligent control, and intelligent robot.