

文章编号: 2095-2163(2022)06-0072-07

中图分类号: TP393; TP212

文献标志码: A

基于雷达测距的自动泊车目标检测与定位设计

李升凯, 吴长水

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 针对在自动泊车过程中超声波受距离、复杂泊车环境、发波时序等影响因素导致目标测距及车辆定位精度不足的问题, 本文设计了一种实时矫正算法和定位系统分别用来实现目标物的精确测距与定位。基于不同距离和不同路面配置3组超声波探头芯片的阈值参数、测量参数, 融合温度、时间同步、环境自适应算法进行收发波处理; 基于一发多收的发波策略和轮询发波时序设计了一套多超声波雷达定位系统。通过实车验证, 在20~240 cm测量范围内, 测距误差不超过1.5 cm。研究表明, 本文设计的算法较大地提高了检测精度, 可适应于复杂环境中的泊车应用。实现目标物的精确测距与定位, 为摄像头与超声波雷达数据融合及可视化距离泊车系统的研发提供了基础。

关键词: 超声波雷达; 实时矫正; 自动泊车; 雷达定位; TC277

Design of automatic parking target detection and location based on radar ranging

LI Shengkai, WU Changshui

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] Aiming at the problem of insufficient target ranging and vehicle positioning accuracy caused by the influence factors such as distance, complex parking environment, and wave timing of ultrasonic waves in the process of automatic parking, this paper designs a real-time correction algorithm and a positioning system to achieve precise ranging and positioning of the target objects. In the research, the threshold parameters and measurement parameters of 3 sets of ultrasonic probe chips are configured based on different distances and different road surfaces, and the temperature, time synchronization, and environmental adaptive algorithms are integrated to transmit and receive waves. A set of multi-ultrasonic radar positioning system is designed based on the strategy of one-transmit-multiple-receive wave and the sequence of polling wave transmission. Through real vehicle verification, within the measurement range of 20~240 cm, the ranging error does not exceed 1.5 cm. The research results show that the algorithm designed in this paper greatly improves the detection accuracy and can be adapted to parking applications in complex environments. Realizing the accurate ranging and positioning of the target provides the basis for the fusion of cameras and ultrasonic radar data and the implementation of the visualized distance parking system.

[Key words] ultrasonic radars; real-time correction; automatic parking; radar positioning; TC277

0 引言

在汽车新四化的大趋势下, 智能化作为其关键领域, 着力于自动驾驶的发展将极大改善人类的出行感受。由于车位窄、停车环境复杂多样、驾驶员技术水平不一等原因, 越来越多的人会期望将自动泊车系统运用到汽车上。目前, 国内外自动泊车系统各有不同, 但都是基于视觉、雷达或二者数据融合作为感知层方案^[1]。纯视觉的泊车方案应用场景受限, 为让自动泊车系统可以得到普遍应用, 采用超声波雷达和视觉数据融合的方案无疑是一种合理的选择。对障碍物的测距和定位、从而实现对外界的高精度感知, 对上层的决策规划算法至关重要。

超声波存在传播速度受外界环境温度较高、时间不同步、散射角大造成的方向性差、对不同路面(如柏油路、草地、碎石路面)回波敏感性差异大等问题, 导致测距与定位精度不足, 有学者利用双比较整流电路有效减小了盲区, 并且设计出软件检测回波峰值的方法^[2-3]。围绕在恶劣环境中提高超声波精度的主题, 已有学者提出了基于回波的自适应延时估计算法^[4]。还有学者为了增大换能器发射功率, 提高回波能量, 设计了一款新型放大电路, 并对换能器进行阻抗匹配, 提高了测距精度与量程^[5-6]。以上方法分别对硬件电路和软件算法进行了优化, 提高了测量精度, 但是对自动泊车中复杂的场景仍难以实现自适应测距, 例如在碎石路面或者草坪上

基金项目: 上海市科委“创新行动计划”项目(17030501300); 上海市地方能力建设(19030501100)。

作者简介: 李升凯(1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 汽车电子及汽车自动驾驶技术; 吴长水(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 汽车电子及汽车自动驾驶技术。

通讯作者: 吴长水 Email: yantz_wu@163.com

收稿日期: 2021-09-13

的泊车场景,会出现误检的情况,影响泊车算法的高效运行。因此,本文基于传感器驱动芯片各种特征参数、环境温度、驱动策略等要素提出一种实时矫正测距与定位算法,适用于复杂的泊车环境以获得准确的障碍物信息。

1 系统硬件设计

1.1 传感器布置

本系统采用 12 路超声波雷达,前后各 4 个短距离雷达用来在自动泊车过程中探测障碍物,避免发生碰撞。左右各 2 个长距离雷达用来探测车位及车位周边情况^[7],为自动泊车的路径规划算法提供准确的路径数据信息。传感器布置示意如图 1 所示。图 1 中,红色双箭头和蓝色双箭头代表自发自收,绿色单箭头代表不发只收,用来有效定位与测距。

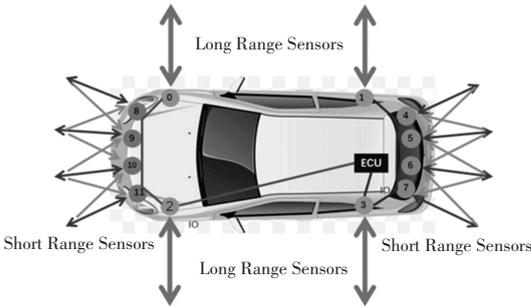


图 1 传感器布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensors layout

1.2 超声波收发电路

传感器由推挽中心抽头变压器供电,以获得最大效率。传感器驱动器建立供电电压 VTANK 和传感器连接之间的接口,如图 2 所示^[7]。

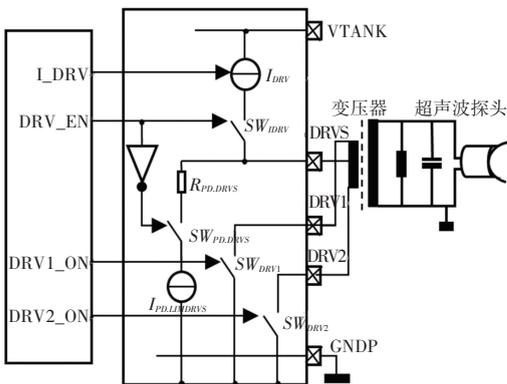


图 2 超声波雷达驱动框图

Fig. 2 Ultrasonic radar driver block diagram

发射模式下,通过外部变压器和传感器产生超声波信号,闭合 SW_{DRV} 给变压器的中心抽头供电,通过控制 SW_{DRV1} 与 SW_{DRV2} 的交替通断,为变压器供

电,进而驱动压电陶瓷振动产生超声波,其中 2 个开关的通断频率就是发射频率。接收模式下,断开 SW_{DRV} ,消除传感器供电的噪声耦合。 $DRVS$ 通过下拉电阻接地,限制电流。将 SW_{DRV1} 与 SW_{DRV2} 断开,此时变压器的一次绕组只与中心抽头相连,而回波信号被传感器引脚 AINS 和 AING 收集,信号经过模拟放大器、模数转换,再进一步经过数字滤波器的处理,降低了传感器对频带以外不想要信号的灵敏度。这里,AINS 接信号线,AING 接传感器地,如图 3 所示。

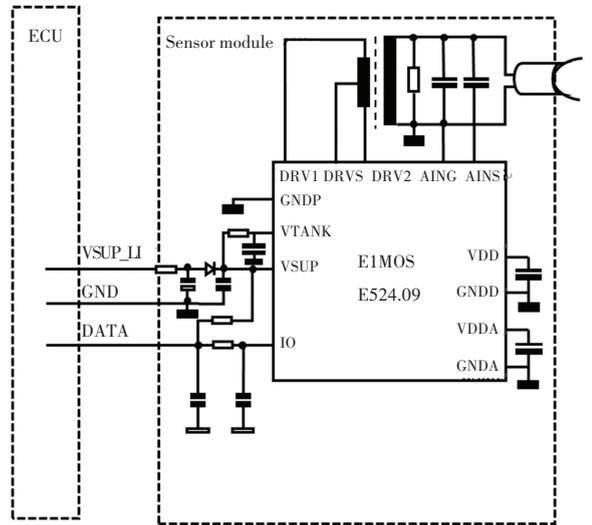


图 3 系统外部电路

Fig. 3 System external circuit

选用 IO 接口驱动的探头,探头内置 elmos 驱动芯片,主 MCU 和 IC 之间采用三线物理接线,分别是供电、数据线、接地。参照驱动芯片研发的通信协议,设计底层驱动,通过控制高、低电平的脉宽实现探头驱动 IC 与 MCU 之间的多命令通信。选用英飞凌 TC277 作为主控芯片,TC277 具有 3 个 CPU 核,CPU 最高频率为 200 MHz。同时设有片上存储器和丰富的外设资源,如保证数据安全传输的 64 通道 DMA 控制器、通用定时器模块(GTM)等。

2 实时矫正测距与定位设计

实时矫正测距与定位方法主要是对系统的多路超声波雷达设计合理的发波时序,融合温度矫正、时间同步矫正、环境自适应矫正,可在情况复杂的环境中实现更加准确的测距与定位^[8]。

2.1 IC 参数配置

利用 elmos 开发的上位机软件实现对超声波雷达的回波信号探测与参数配置,碎石路面回波探测

图如图4所示。图4中,横坐标表示距离,纵坐标表示回波强度,红色线条代表设定的阈值曲线,绿色线条代表回波信号,蓝色线条代表IO高低电平信号。当回波信号高于阈值曲线时,IO线被拉低,此时MCU即可检测到障碍物。阈值可通过上位机软件进行配置,以获得准确的回波检测结果。图4中未设置目标障碍物,用来观测复杂路面对障碍物的回波影响。由图4可见,在2000mm和2600mm处碎石回波信号较大,有较大可能对障碍物的检测造成影响,所以需要提高相应阈值及优化IC的滤波降噪配置。

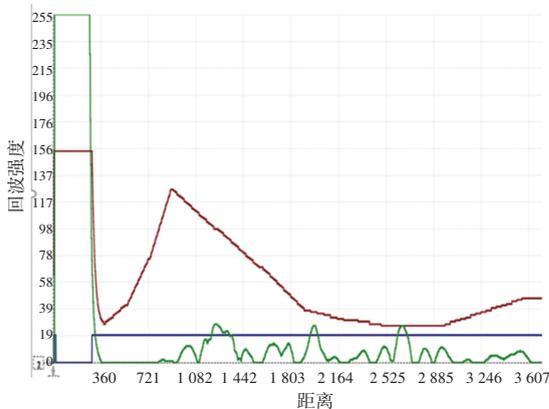


图4 碎石路面回波信号检测

Fig. 4 Echo signals detection on the gravel pavement

改变阈值参数和滤波降噪都是通过 elmos 的开发板利用 JTAG 接口对 IC 内部寄存器和 EEPROM 进行配置,最终得到一组理想配置参数。经过多次参数配置,最终同样在碎石路面放置标准 PVC 管,回波信号如图5所示。经过配置合理的阈值、滤波降噪后,碎石的回波信号衰减较强,同时可在2500mm的位置依然可稳定检测到PVC管回波信号。

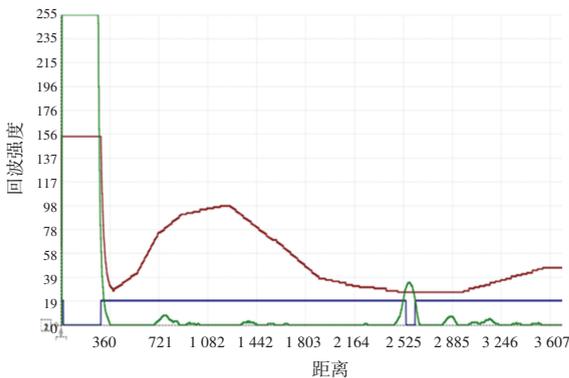


图5 优化后碎石路面远距障碍物回波信号检测

Fig. 5 Detection of echo signals from long-distance obstacles on the gravel pavement after optimization

优化后碎石路面近距障碍物回波信号检测结果如图6所示。由图6可知,声波强度随时间逐渐减

弱,图5的2500mm处和图6的1400mm处回波信号形成明显对比,距离越远、回波信号越弱,因此为了能适应近、中、远距离的最优测量,需要设计合理矫正算法。

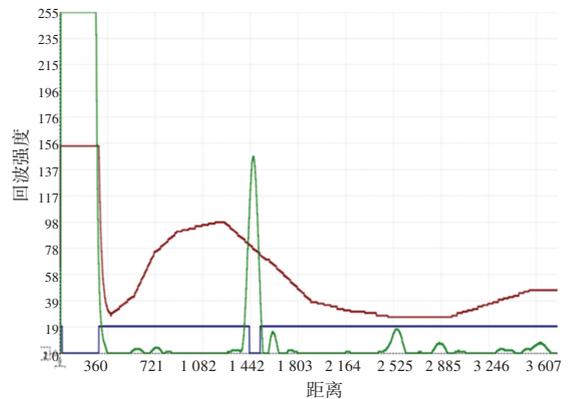


图6 优化后碎石路面近距障碍物回波信号检测

Fig. 6 Detection of echo signals from close obstacles on the gravel pavement after optimization

2.2 实时矫正算法设计

2.2.1 温度矫正

超声波速率受环境温度影响极大,温度每变化 1°C ,速度变化 0.6 m/s ,进而影响对障碍物的检测。超声波速率与温度关系如式(1)所示:

$$V = 331.45 \times \sqrt{1 + \frac{T_c}{273}} \quad (1)$$

其中, V 是超声波速率; T_c 是当前环境温度。

当前环境温度由超声波雷达的温度和车辆外部温度融合,前者温度可由MCU发送温度获取命令取得,车辆外温通过CAN总线获取。

设定5s获取一次超声波雷达温度,设置冗余机制,同时获取多个超声波雷达温度,设定所得各传感器温度偏差在10%范围内数据有效。研究推得的数学公式可写为:

$$T_c = (T_u + T_e)/2 \quad (2)$$

其中, T_u 是超声波雷达温度, T_e 是车辆外温。

2.2.2 时间同步矫正

由于MCU驱动多个超声波雷达会产生计时不同步的问题,导致测距精度降低,所以需要设计时间同步矫正算法。此处需要用到的数学公式可写为:

$$t_1 = t_0 + (t_{send} - t_{rev}) \quad (3)$$

其中, t_1 是矫正后的回波时间; t_0 是未矫正的回波时间; t_{send} 是当前发波通道的发波时间戳; t_{rev} 是当前收波通道的时间戳。

2.2.3 环境自适应矫正设计

如前文所述,为减少复杂环境对回波检测造成

的干扰,同时满足不同距离设置不同的检测参数以避障的需求,本文设计了一种不同环境下配置 3 组不同测量参数以满足不同环境状况和探测距离的探测算法。由于存在安装位置、角度、震动的偏差,环境自适应算法需在温度、时间矫正的基础上进行整车环境标定,具体的标定方法如下:使用业界标准障碍物 PVC 管对超声波进行多位置的多次测量,记录各位置平均距离。

设定 10 cm 为界,通过两点线性插值法^[9],得到 2 个校准参数。标定工作在台架上进行,将超声波雷达按照设计的位置进行安装。台架模型实物图见图 7。



图 7 台架模型

Fig. 7 Bench model

这里,进一步求得的数学公式为:

$$Y = aX + b \quad (4)$$

其中, a 和 b 是校准参数; X 是经温度和时间矫正后的距离; Y 是经标定测试校准后的距离。

本系统使用的超声波雷达可通过 IO 设定其内部寄存器对应的阈值参数、测量参数。其中,阈值参数设定包括各个距离段的回波检测阈值,测量参数设定包括发射信号的配置、回波检测方式、数字增益、降噪配置等。

所用超声波雷达支持在线存储 3 组发射信号配置参数,包括发射信号脉冲数、测量时间、阈值放大系数,根据近、中、远及泊车路面(草地、柏油路、碎石路面)不同环境的回波特性进行多次参数调试,确定不同环境下最优参数配置,大大提高了测距定位系统的可靠性。

2.2.4 软件设计

传感器 IC 内有寄存器和 EEPROM,分别用来存储特定配置参数。域控制器通过一根 IO 硬线与 IC 进行通信,控制 IO 线高、低电平的时序可实现多命令通信。通过前期进行的测试,确定在不同环境下各自较优配置参数和各阶段阈值水平,通过发送 MEAS_SETUP 和 THRES_SETUP 命令分别设置较优参数与阈值。此后发送 READ_STATUS 命令可获

取状态信息,随之就是发送 SEND_X 或 RECEIVE_X 命令进行发波或收波。

实时矫正算法逻辑流程如图 8 所示。由图 8 可知,算法流程基于参数配置成功,上电后 IC 寄存器设为默认值,首次收波或发波命令基于默认配置,任意一个传感器发波 MCU 开始计时,回波检测是 MCU 捕获 IO 的跳变沿,得到回波时间与幅值等信息。得到初步回波时间,下一步将进行温度的矫正。为了提高系统可靠性、避免因单个探头故障而产生漏检,进行多探头温度的冗余比较。若温度矫正失败,则重新进行首次收发波命令,成功,则进行时间同步矫正计算出初步距离。根据标定得到的校准系数进行线性插值对距离进行校准,当校准后的距离 $L \leq 50$ cm 时,配置 ProfileA 的测量参数进行发波或收波;当校准后的距离 $L \leq 200$ cm 时,配置 ProfileB 的测量参数进行发波或收波;当校准后的距离 $L > 200$ cm 时,配置 ProfileC 的测量参数进行发波或收波;系数校准后得到的测量距离输入自动泊车算法中。

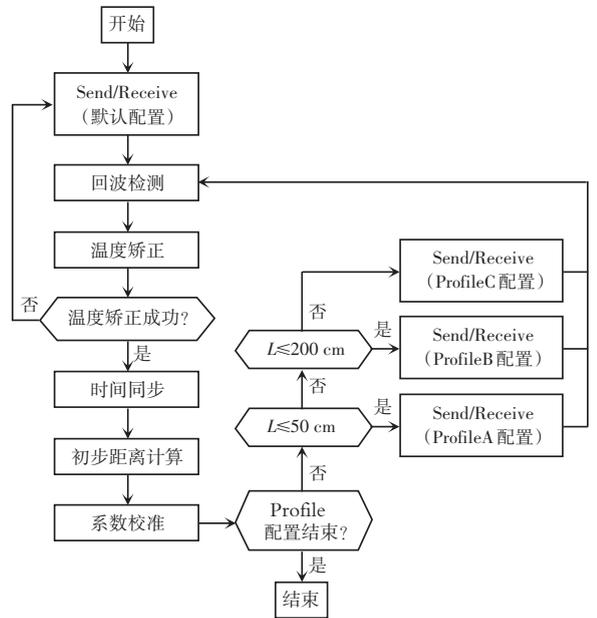


图 8 实时矫正算法逻辑流程图

Fig. 8 Real-time correction algorithm logic flow chart

2.3 目标定位算法

定位原理设计如图 9 所示,展示了一发三收的定位原理,图 9 中只展示 2 个目标物用来示意,可实现左、右两侧多目标同步定位。在实际情况中,由于超声波呈不规则锥形包络线发射,同一物体在声波反射的可探测角度内可探测其多个部位^[10]。在二维坐标系中,设置 O 为自发自收探头位置,并设置为坐标原点, A 、 B 为只收探头位置,探头之间位置、

即 OA 、 OB 由安装位置已确定。距离 d 、 $d+a$ 、 $d+b$ 的值可由超声波测出,目标物 1 的位置可由余弦定理得出:

$$\cos \theta = \frac{d^2 + OB^2 - a^2}{2 \times d \times OB} \quad (5)$$

$$x = d \times \cos \theta, y = d \times \sin \theta \quad (6)$$

其中, x 、 y 分别为目标物的横纵坐标。

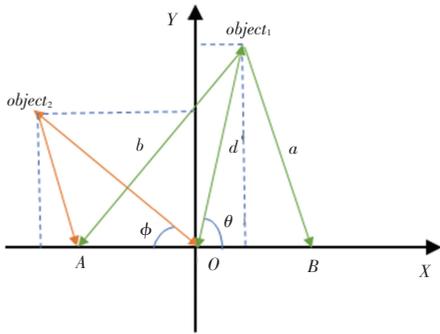


图9 定位原理设计

Fig. 9 Positioning principle design

2.4 发波时序设计

采用的超声波雷达有 2 种测量模式,分别是:自发自收和不发只收。

为了更加准确定位障碍物,可利用一发多收的方法实现三角定位。为了避免相邻探头发波的干扰、同时提高测距定位的效率,设计合理的发波时序。前后 8 个短距超声波探测距离为 15~250 cm,用来避撞;左右 4 个长距超声波的探测距离为 30~500 cm,用来探测车位信息^[9]。设计每次一个短距超声波雷达和 2 个长距超声波雷达同时发波^[11],发波的短距雷达及临边短距雷达和最近一次发波的长距雷达同时收波,需要循环 8 次即可遍历所有雷达。文中设计了系统收发波时序如图 10 所示。

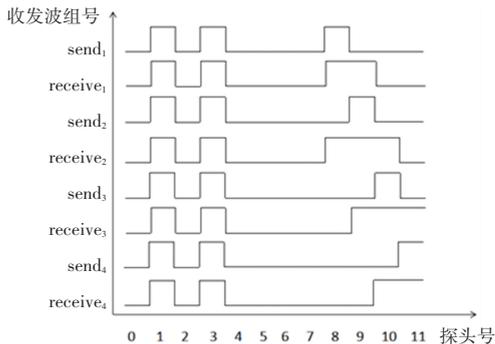


图10 超声波雷达收发波时序示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the time sequence of transmitting and receiving waves of ultrasonic radars

图 10 中表示出车头 4 个短距雷达及车后侧 2 个长距雷达的收发波时序,其余 6 个雷达收发波时

序原理相同,图中的探头号见图 1 传感器布置图。

2.5 Free Space 设计

基于目标定位与测距算法设计 Free Space 区域用来实现超声波自动泊车。前后共 8 个 UPA 雷达、水平发射角为 120° ,设定最大探测距离为 2.5 m,左、右共 4 个 APA 雷达、水平发射角为 80° ,设定最大探测距离为 5 m。在泊车过程中,通过串口打印并保存多组探测数据。在每个探头水平发射角内,等角度取 20 组探测数据,超过最大探测距离的位置记为最大探测距离。这里给出的 Free Space 展示如图 11 所示,射线区域内即为自由泊车区域。

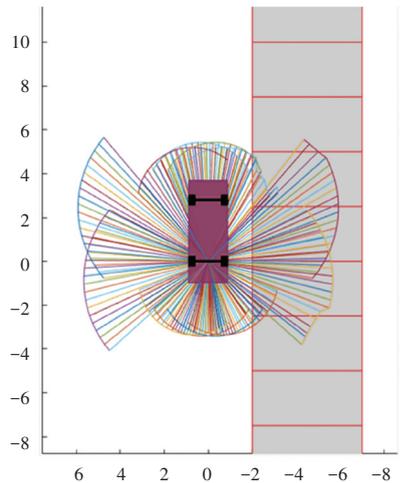


图11 Free Space 展示

Fig. 11 Free Space display

3 实验验证与分析

以一款纯电动汽车为载体,利用智能驾驶域控制器集成软件,在室外静态条件下进行算法验证。选择业界标准 PVC 管作为被测障碍物,选择 360 cm × 250 cm 规格的标定布,如图 12 所示。



图12 实车验证

Fig. 12 Real vehicle verification

对系统功能进行测试,为了验证实时矫正算法的有效性,本文分别针对矫正前与矫正后进行了 2 次对比测试,选择汽车前面 4 个传感器进行测量。在标定布上随机摆放 PVC 管,设定自发自收模式,利用串口在 PC 机得到实时测量数据,实际距离用

激光测距仪标定。

未矫正实测误差结果如图 13 所示。按上述测量方法测得数据见表 1。表 1 中,激光测距仪测量的是探头到 PVC 管同一高度中心位置的距离。测

量距离分别是同一位置 3 次的测量值,平均值则为 3 次测量距离的平均后的结果值。可见,未经矫正过的超声波雷达测距最大误差可达 8 cm,难以实现泊车过程中准确的测量与定位。

表 1 未矫正的短距超声波雷达实测数据

Tab. 1 Measured data of uncorrected short-range ultrasonic radars

| 实际距离/cm | 测量距离 1/cm | 测量距离 2/cm | 测量距离 3/cm | 平均距离/cm | 绝对误差/cm | 相对误差/% |
|---------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|--------|
| 18.5 | 22.7 | 23.4 | 22.4 | 22.83 | 4.33 | 23.42 |
| 27.1 | 29.1 | 30.9 | 29.5 | 29.83 | 2.73 | 10.09 |
| 34.1 | 30.4 | 31.6 | 36.4 | 32.80 | -1.30 | -3.81 |
| 56.3 | 57.9 | 58.3 | 59.4 | 58.53 | 2.23 | 3.97 |
| 68.5 | 72.4 | 70.1 | 65.4 | 69.30 | 0.80 | 1.17 |
| 79.4 | 84.6 | 85.1 | 81.9 | 83.87 | 4.47 | 5.63 |
| 89.6 | 94.6 | 96.7 | 96.4 | 95.90 | 6.30 | 7.03 |
| 100.7 | 104.1 | 97.9 | 104.5 | 102.17 | 1.47 | 1.46 |
| 120.4 | 114.9 | 116.3 | 115.4 | 115.53 | -4.87 | -4.04 |
| 140.6 | 136.8 | 135.7 | 137.1 | 136.53 | -4.07 | -2.89 |
| 165.4 | 169.7 | 162.7 | 160.3 | 164.23 | -1.17 | -0.71 |
| 182.5 | 178.5 | 179.5 | 176.4 | 178.13 | -4.37 | -2.39 |
| 202.4 | 204.9 | 206.4 | 206.9 | 206.07 | 3.67 | 1.81 |
| 220.1 | 215.1 | 214.9 | 217.3 | 215.77 | -4.33 | -1.97 |
| 243.3 | 248.9 | 251.4 | 252.2 | 250.83 | 7.53 | 3.10 |

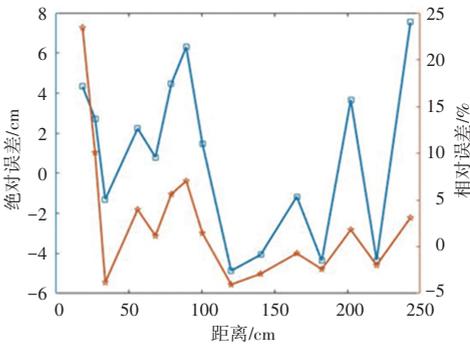


图 13 未矫正实测误差图

Fig. 13 Uncorrected measured error graph

集成了实时矫正算法后,采用与上面相同的测量方法进行实车测试,所得数据见表 2。由表 2 可见,最大误差控制在 1.5 cm 以内,满足自动泊车算

法中对测距与定位的精度要求。研究后得到的矫正后实测误差结果如图 14 所示。

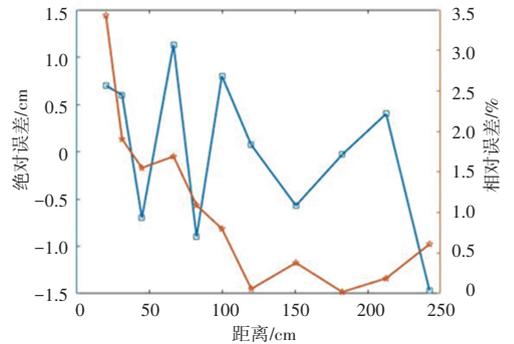


图 14 矫正后实测误差图

Fig. 14 Measured error graph after correction

表 2 矫正后短距超声波雷达实测数据

Tab. 2 Measured data of short-range ultrasonic radars after correction

| 实际距离/cm | 测量距离 1/cm | 测量距离 2/cm | 测量距离 3/cm | 平均距离/cm | 绝对误差/cm | 相对误差/% |
|---------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|--------|
| 20.4 | 21.1 | 20.9 | 21.3 | 21.10 | 0.70 | 3.43 |
| 31.5 | 31.8 | 32.2 | 32.3 | 32.10 | 0.60 | 1.90 |
| 45.1 | 44.3 | 44.2 | 44.7 | 44.40 | -0.70 | 1.55 |
| 66.8 | 65.4 | 66.1 | 65.5 | 65.67 | 1.13 | 1.69 |
| 82.6 | 81.4 | 81.6 | 82.1 | 81.70 | -0.90 | 1.09 |
| 100.0 | 100.5 | 100.8 | 101.1 | 100.80 | 0.80 | 0.80 |
| 120.2 | 119.6 | 120.8 | 120.4 | 120.20 | 0.07 | 0.06 |
| 150.8 | 150.3 | 150.4 | 150.3 | 150.20 | -0.57 | 0.38 |
| 182.6 | 182.9 | 182.2 | 182.6 | 182.50 | -0.03 | 0.02 |
| 212.7 | 213.5 | 212.1 | 213.7 | 213.10 | 0.40 | 0.19 |
| 242.5 | 240.4 | 241.1 | 241.6 | 241.00 | -1.47 | 0.61 |