

基于声传播的智能定位系统

摘要：本智能定位系统以树莓派为控制核心，由声音信号发射、声音信号接收、声源定位、用户交互界面 4 个基本模块构成。基于固体表面声传播的特性，采用基于神经网络的被动式声源探测与定位方法应用深度神经网络，实现了在 2s 左右以较高准确率对亚克力板表面敲击、磁铁圆片的定位。

关键词：声学色散 深度学习

1.系统方案比较与设计

1.1 设计要求

设计并制造一套智能定位系统，在一个 450mm 边长的正方亚克力形平面板中注入声音，系统在通过声电部件转换后探测到信号，同时定位声源。基本要求包括在 5 秒内探测定位敲击声源，并按特定格式显示方格编号。发挥部分则需在更精细的方格内定位磁铁圆片，并能显示其直角坐标，误差不大于 10mm。

1.2 方案论证与理论分析计算

根据题目要求，将系统分为 4 个基本模块：声音信号发射、声音信号接收、声源定位、用户交互界面。系统总体设计框图如图所示：

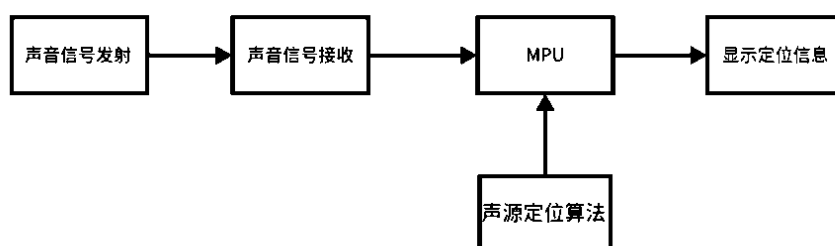


图 1

1.2.1 声音信号发射

方案一：将树莓派产生的信号通过 DAC 转换模组后，采用功率放大器进行放大后使用扬声器播放声音。在试用了 OP07、TDA2030、LM286 功放后，15~20kHz 频率的声音播放效果依旧不佳。

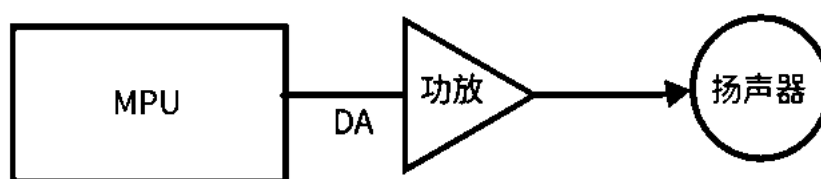


图 2

方案二：通过树莓派产生信号，使用集成声卡进行模数转化后通过扬声器模块播放声音。集成声卡内置功放，相较于自制外接功放效果更佳。然而，在电声转换装置的选取上，虽然扬声器模块能够产生响度更大的音频，但是由于固体传声需要更大的接触面，扬声器的回音腔反而成为阻碍振动传滴的负面因素；同时，扬声器通常内置滤波模块，难以输出 15kHz~20kHz 频率的声音。

方案三：由树莓派产生信号，通过集成声卡进行模数转化后使用压电陶瓷蜂鸣片。利用逆压电效应，当给压电陶瓷片施加电场时，其会产生机械变形，并且应变与电场强度成正比，施加的电场强度越强，振动的幅度越大。利用无源压电陶瓷蜂鸣片进行电声转化，可以产生 15kHz~20kHz 频率的声音，具有非常高的灵敏度，同时有较大的可接触面积，有利于振动的传导。

综合以上考虑，选取方案三进行声音信号发射。

1.2.2 声音信号接收

1.2.2.1 声电转换方式

采用对面粘贴的压电陶瓷蜂鸣片进行声电转化。相较于同面的蜂鸣片接收到的为反射后信号，对面式粘贴的蜂鸣片接收到的声音信号为亚克力板直接传声信号，故此方案可以降低衰减。

1.2.2.2 模数转换方式

将板子的振动信息转化为单片机可以处理的数字信号，需要进行模数转换。与此同时，根据题目中 M 区域的方格大小（边长 2.5cm）以及亚克力板中的声速（按 3000m/s 估计），至少在约 8 微秒内处理一次声音信号。

方案一：使用 PCF8591 模块。由于 PCF8591 模块与树莓派间的通信遵循 I2C 协议，而树莓派的 I2C 速率最大值仅能达到 400000Hz，即每 2.5 微秒可处理一个比特的数据，如果要达到基础部分任务 2 中测速的精度要求，则每次只能处理 3 位数据，位深过低。

方案二：使用 ad7606 ADC 采样模块，性能强大，支持 8 通道信号处理，200kSPS 下支持高达 16 的位深。然而，由于 AD7606 没有内部的寄存器，需要直接利用引脚配置 ADC 的模式，需要占用的 I/O 口的资源很多。

方案三：使用树莓派 PICO 集成的具备 ADC 功能的 GPIO 外设。

1.2.3 声源探测与定位

1.2.3.1 主动式声源探测与定位

利用声表面（SAW）波滤波器原理，基于亚克力板中声音传播的特性和改

变亚克力板表面特征即可改变其滤波器特性的性质，采用主动式声源进行物体探测与定位。

方案一：声音发射装置与接收装置置于一体。具体方式为，基于 FMCW ,在扫频周期内发射频率变化的连续波, 利用反射信号与发射信号混频得到的频率偏移来进行 ToF（飞行时间）的测量，进而测出信号源和反射物体之间的距离。差频信号频率较低，一般为数千赫兹，因此硬件处理相对简单、适合数据采集并进行数字信号处理。

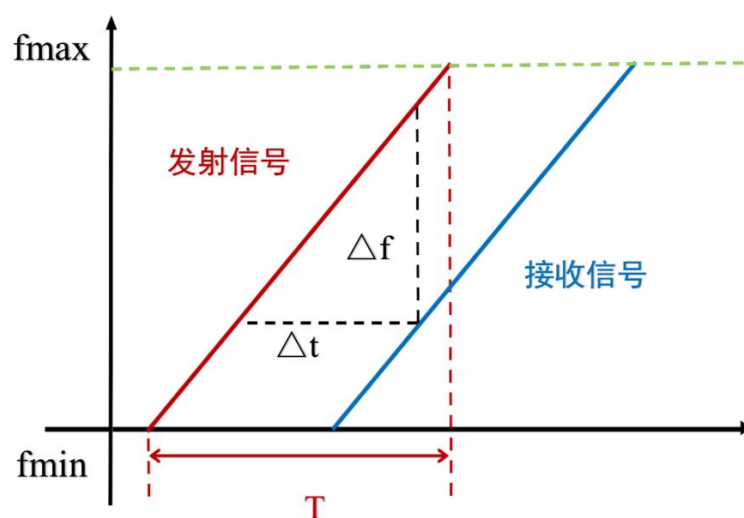


图 3 FMCW 测距原理

方案二：声音发射装置与接收装置置于相对不同的位置。然而，由于树莓派的声卡难以精确同步，声卡不同频会造成大约 48 帧的误差；由于 48000 的采样率以及 2600 米每秒的声速，每 1 帧的误差能造成约 5.4 厘米的测量误差，因而不同频在造成的误差高达 2.59m，不满足要求。

1.2.3.2 被动式声源探测与定位

表面式触摸声音具有声学色散（acoustic dispersion）的特性。敲击表面或者放置磁铁圆片的过程本身就会产生一种触声，并以横向的方式通过表面传播，

导致其通道周围的气压发生变化。由于固体表面是一种色散介质，以不同的速度传播不同频率的波。因此，固体表面传播的音频通道包含了丰富的特征集，且特征表征稳定，在音频信道的多径剖面可以实现细颗粒度的区分。

在探测到表面声波后，主要有两种算法进行数据的处理以及声源定位。

方案一：基于传统方式建模。

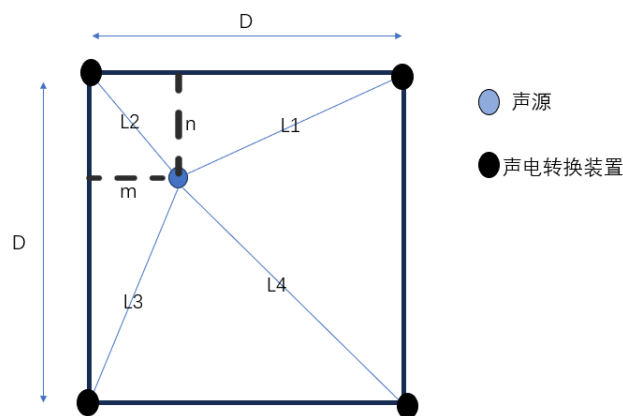


图 4 基于传统方式建模计算思路

计算思路为：

$$\begin{cases} (D-m)^2 + n^2 = L_1^2 \\ m^2 + n^2 = L_2^2 \\ (D-n)^2 + m^2 = L_3^2 \\ (D-n)^2 + (D-m)^2 = L_4^2 \end{cases} \quad (1)$$

其中， $L_i^2 = (vt_i)^2 - x$ ， t_i 是第 i 个声电转换装置接收到的声音发出的绝对时间， x 为从时间起点到此声源信号开始之间的时间差与亚克力板中声源传播速度的乘积。未知参数 v 通过两次测量消去。

具体计算时，一共有两种思路，第一种思路为检测声波的最高峰，然后比较最高峰的时间，但是在实验中发现声波的最高峰的位置会有很大的偏差，不同位置接收到的声音信号差别非常大。第二种思路为检测刚开始检测到的声音放到时间，这个检测是通过感应声音的振幅相较于上一帧声音振幅的偏差，偏

差超过某一阈值，判定接收到声音，但是这种方法在相同点敲击也会有三到五帧的偏差，误差为该题需要精度的两倍以上。

方案二：基于深度学习。

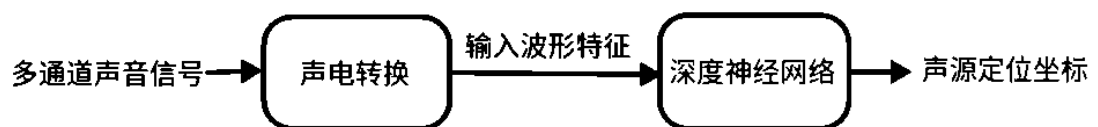


图 5 利用深度学习进行声音探测与定位的基本思路

基于深度神经网络实现的智能定位算法可以很好的克服传统方式进行建模时忽视物理因素造成模型不精确的问题，同时训练得到的模型可以通过迁移学习应用至其他智能定位系统，应用前景更加广阔。

在实际制作了基于两种方式的智能定位装置之后，我们发现，主动式声源探测与定位的方案一在空气中进行传声与定位能够达到良好的效果，然而有悖于题目将声音注入平面板的要求，而亚克力板却并不是声表面滤波器的好介质，在其上进行主动传声与定位效果远不如空气中传声。同时，主动式声源探测与定位，需要额外能够发射特定声波的信号源，能量效率不高且实用性不强。与之相反的，基于神经网络的被动式声源探测与定位方法，避开了亚克力平面板表面传声因为没有谐振腔而信号微弱的劣势，发挥了固体表面传声可以有效抵抗空气中环境噪声干扰的优势，实现了节能、便携、有应用开发前景的智能声音探测定位，因此我们采用此方案。

图 7

3.测试方案与测试结果

通过交叉验证数据集的方式，此智能定位系统的神经网络在测试集的表现如下：

表 1 神经网络在测试集的表现

任务	Test loss	Test accuracy
基本要求 (2)	0.59	0.96
发挥部分 (1)	0.62	0.93
发挥部分 (2)	1.02	0.76

对此智能定位系统投入实际使用，通过随机取 300 个 6x6 大方格中的格点进行敲击，随机取 300 个 12x12 小方格中的格点放置磁铁圆片，随机取 300 个放置磁铁圆片，统计定位正确率以及平均所需定位的时间，得到如下结果：

表 2 系统实际测试定位准确率、速率

任务	准确率	探测定位耗时
基本要求 (2)	94%	2s
发挥部分 (1)	78%	2s
发挥部分 (2)	62%	3s

可见，此基于声传播的智能定位系统基本实现题目要求。