

模块 8

实验：ADC 数据采集系统



实验：ADC 数据采集系统

8.0 目标

本实验的目的是连接红外测距传感器，让机器人探索它的世界，见图 1。

1. 您将使用 ADC 输入数据到微控制器。
2. 您将使用周期性中断以常规速率对 ADC 进行采样。
3. 您将研究数据采集系统中产生的噪声。
4. 您将评估一个简单的数字滤波器，以尝试提高**信噪比**，信噪比定义为信号振幅除以噪声振幅。
5. 您将评估测量的准确度和分辨率。

小知识：您已在实验 2 中创建了采样数据采集系统。即，软件对循线传感器采样 100 次/秒。但是，在本实验中，您将以更基本的方式研究抽样。这是大多数嵌入式系统执行的三项任务：收集数据，制定决策和影响输出。在本实验中，我们将专注于收集数据，但机器人挑战将需要决策和输出。

8.1 入门

8.1.1 从下面的软件工程起步

浏览以下工程：

ADCSWTrigger（忙等待 ADC 接口，简单的数字滤波器，周期性中断采样）

Lab_ADC_Potentiometer（实现电位器数据采集并在 PC 端串口进行打印）

Lab_ADC（本实验的入门项目）

8.1.2 参考资料

MSP432P4xx Technical Reference Manual, ADC14 (SLAU356)

MSP432P401R Datasheet, msp432p401m.pdf (SLAS826)

GP2Y0A21YK0F_IR_Distance_Sensor.pdf, datasheet

8.1.3 阅读材料

Volume 1 Sections 10.1, 10.4, and 10.5

Embedded Systems: Introduction to the MSP432 Microcontroller",
or

Volume 2 Section 8.4, and Chapter 10

Embedded Systems: Real-Time Interfacing to the MSP432 Microcontroller

小知识：模数转换是微控制器执行的最基本操作之一。ADC 采样要求我们在振幅和时间维度上进行近似。噪声通常是大多数数据采集系统的限制因素。

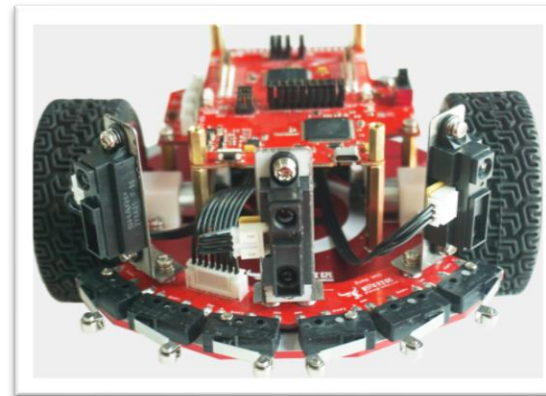


图 1.位于机器人前部的三个红外测距传感器。

8.1.4 本实验所需组件

数量	组件描述	制造商	型号
1	MSP-EXP432P401R LaunchPad	TI	MSP-EXP432P401R
3	IR Distance Sensor (GP2Y0A21YK0F)	SHARP	
3	IR cable	JiangNiu	
6	M3*8screw	JiangNiu	
1	V1.1 转接板	JiangNiu	
1	电位器模块	JiangNiu	

表 1 本实验所需的部件。



实验：ADC 数据采集系统

8.1.5 所需实验设备

示波器（1 个或 2 个至少 10 kHz 采样的通道）
逻辑分析仪（4 个至少 10kHz 采样的通道）
可选：频谱分析仪

8.2 系统设计要

第一个目标是将电位器模块连接到我们的机器人，然后将电位器的输出连接到 MSP432 Launchpad 上的 ADC 转换器的输入。通过旋转电位器的旋钮，电位器将输出 0-3.3V 的电压值，经过 ADC 转换器 MSP432 将采集到 0-16383 的数值。您可以将该数值进行运算和转换并赋值给电机的占空比（PWM 值），对机器人进行调速。电位器模块安装如下图 2 所示：

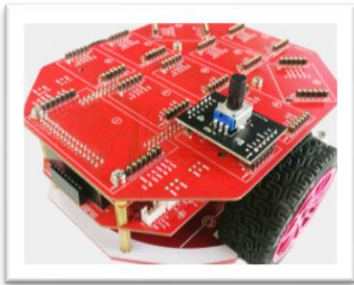


图 2. 电位器模块安装位置

第二个目标是将三个 GP2Y0A21YK0F 红外测距传感器连接到机器人，然后将传感器的输出连接到 MSP432 Launchpad 上的 ADC 转换器的输入。然后，您将把原始 ADC 信号转换为“距离”，即为模拟域到数字域的转换。软件加上校准功能将允许机器人测量到墙壁的距离。测量范围值为 70 至 800 毫米。分辨率在 200 毫米时约为 1 毫米。

图 3 显示了 IR 传感器输出与墙壁距离之间的测量关系（使用块木块和尺子）。请注意传感器的非单调行为... 例如，如果系统记录的传感器值为 2 V，则可能意味着 33 mm 或 130 mm。在机器人挑战期间，您将努力使机器人远离墙壁，因此您将假设传感器距离大于 70 mm。由于机器人挑战的性质，我们对超过 800 毫米的距离不感兴趣。

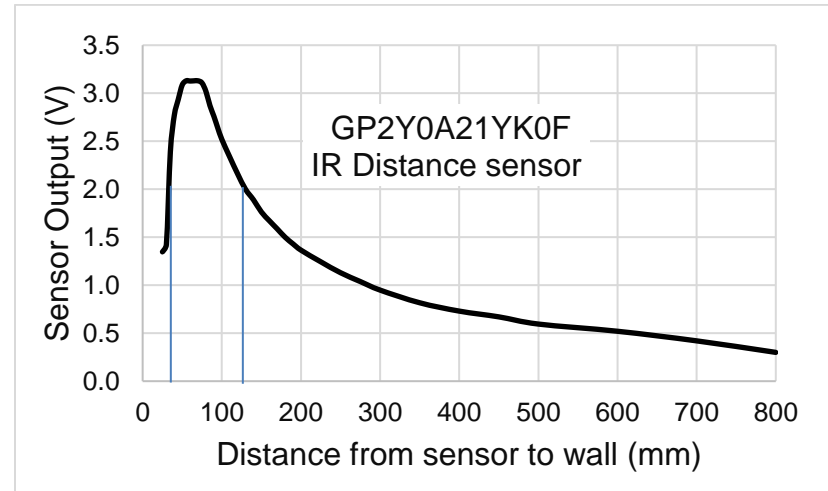


图 3. 作为距离函数的典型传感器输出。

您将开发一种功能，将原始 ADC 样本转换为从墙上测量的距离。设 n 是来自 ADC 的 14 位样本（0 到 16383）， X 是从传感器到墙的距离（mm）。这种非线性传递关系的基本形式是双曲线，

$$X = A/(n + B)$$

其中 A 和 B 是根据经验确定的校准系数。

上面的等式定义了从传感器到墙壁的距离。但是，您的系统应将机器人上的一个公共点定义为起点以用于测量距离（ D_r , D_c , D_l ），距离的单位为 mm，如图 4 所示。该公共参考将允许机器人使用几何和两个距离测量来计算与墙壁的角度。为了处理这种参考变化，我们将引入第三个校准系数。将 n_r , n_c 和 n_l 定义为三个 ADC 输入。设 A_r , A_c , A_l , B_r , B_c , B_l , C_r , C_c 和 C_l 为校准系数。

$$D_r = A_r / (n_r + B_r) + C_r$$

$$D_c = A_c / (n_c + B_c) + C_c$$

$$D_l = A_l / (n_l + B_l) + C_l$$



实验：ADC 数据采集系统

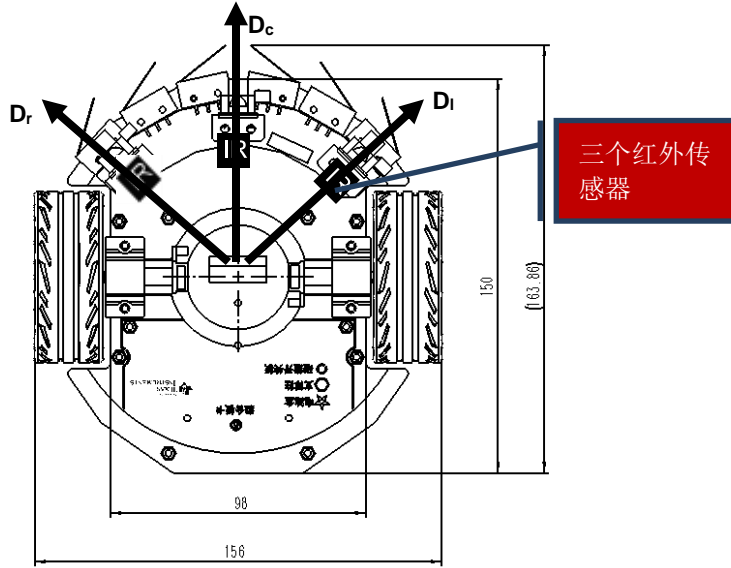


图 4. 定义从机器人中心点测量的距离。

传感器的最大测量距离为 800 mm，因此如果 ADC 值小于某个阈值，则您的功能应返回 800 + C。函数的 C 原型是

```
int32_t LeftConvert(int32_t nl); // returns left distance in mm
int32_t CenterConvert(int32_t nc); // returns center distance in mm
int32_t RightConvert(int32_t nr); // returns right distance in mm
```

本实验的第二个目标是使用周期性中断对 ADC 进行采样。周期性触发 ADC 被定义为采样，允许系统在时域和频域处理数据。例如，定期收集数据允许您实现数字滤波器，该滤波器在阻挡其它频率时也会传递一些频率的数据。数字滤波器的目的是提高信噪比。你将研究这个低通滤波器

$$y(n) = (x(n)+x(n-1)+...+x(n-N-1))/N$$

对于 N = 1 到 512，x (n) 是当前样本，x (n-1) 是前一个样本，x (n-2) 是第二个前样本，...而 y (n) 是当前过滤器输出。您将使用采样数据来研究基本概念，如范围，分辨率，精度，过采样和奈奎斯特理论，混叠，噪声，概率质量函数，信噪比和中心极限定理。

脉冲数字序列具有一个非零值，序列中的其余点为零，...，0，0，0，1，0，0，0，... 滤波器的脉冲响应是输入为脉冲时滤波器的输出。如果 N = 4，则该滤波器的脉冲响应为...，0，0，0，1/4，1/4，1/4，1/4，0，0，0... 这个滤波器称为有限脉冲响应（FIR）滤波器，因为脉冲响应在非零输出上具有有限数量。

阶跃（step）数字序列具有无限数量个零，后跟无穷多个相同值的非零，...，0，0，0，1，1，1，... 滤波器的阶跃响应（step response）是滤波器的输出，给定输入是阶跃函数。如果 N = 4，则此滤波器的阶跃响应为...，0，0，0，0.25，0.5，0.75，1，1，1，... 换句话说，如果到墙的距离发生变化，此滤波器将导致软件看到输入变化的时间延迟。您将选择滤波器而不是提高信噪比，而不会在阶跃响应中造成太多延迟。

第三个目标是评估距离测量的准确性。准确度（Accuracy）被定义为真值与实测值之间的差异。设 x_t 是从机器人参考点到墙壁的真实距离，用尺子测量。仪器精度是整个系统，包括传感器，电子设备和软件，依据国家标准与技术研究院（NIST）而得到的绝对误差。设 x_m 为仪器测量的值。我们将满量程的平均准确度定义为

$$\frac{100}{n} \sum_{i=0}^n \frac{|x_{ti} - x_{mi}|}{x_{t \max}}$$

系统分辨率（resolution）是包括传感器，电子设备和软件的整个系统所能检测到的最小输入信号差 Δx 。系统的分辨率受到传感器本身的噪声处理，电子器件中的噪声处理以及 ADC 中的位数的限制。对于本实验，分辨率将受到红外测距传感器中噪声的限制。

8.3 电位器实验准备

我们将采集电位器模块的电压值，经过 ADC 转换器转换，把转换后的数值通过 PC 端口打印出来。您将在机器人上面安装 V1.1 转接板，然后在 V1.1 转接板的 ②号位置安装电位器模块。该案例电位器模块将连接到 MSP432 的 P8.5 引脚使用 A20 通道。引脚连接如下图 5 所示：



实验：ADC 数据采集系统

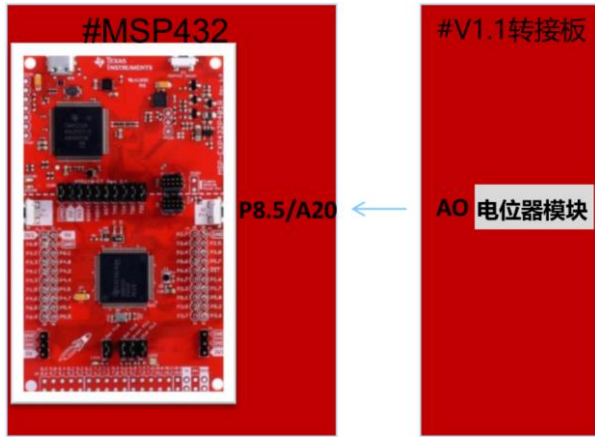


图 5. 电位器引脚连接

8.4 电位器实验步骤

电位器模块使用的是 P8.5 的 ADC 功能，我们要初始化 P8.5 引脚的 ADC 功能。首先配置 MSP432 内部的硬件 ADC 模块，然后选用 P8.5 引脚 ADC 功能，初始化函数具体实现见 ADC14.c 文件中的 `void ADC0_InitSWTriggerCh20(void)`;

设置读取连接 P8.5 引脚通道 A20 对应的 ADC 转换器转换后的数值，读取函数具体实现见 ADC14.c 文件中的 `uint32_t ADC_In20(void)`;

8.5 红外测距实验准备

您将在机器人前部附近安装三个红外测距传感器。回想一下，传感器对于 0 到 70 毫米的距离感到困惑（图 3），最好使传感器安装的位置远离机器人的边缘。图 1 中的机器人将红外测距传感器安装到了距离碰撞传感器激活位置 25mm 的地方。因此，当距离墙壁 25 至 70 mm 时，此机器人将报告不正确的距离。确切的位置和角度将作为您尝试的机器人挑战的一部分进行重新调整。对于本实验而言，确切放置传感器的位置并不重要，请参见图 4。

图 6 中的接口电路将传感器输出直接连接到 ADC 输入。可以使用任何 ADC 输入引脚，但复杂设计的问题是为特殊用途分配引脚，如定时器 PWM，边沿触发输入，UART，SPI 和 ADC。图 6 中显示的三个引脚与这些模块中的其它实验不冲突。将红外传感器连接到 +5V 电，+5V 电源已被简单地标记为 +5V。传感器噪声很大，

每个传感器都需要一个电源电容。该图显示 10 μ F，但 4.7 至 47 μ F 的任何电容都可以使用。

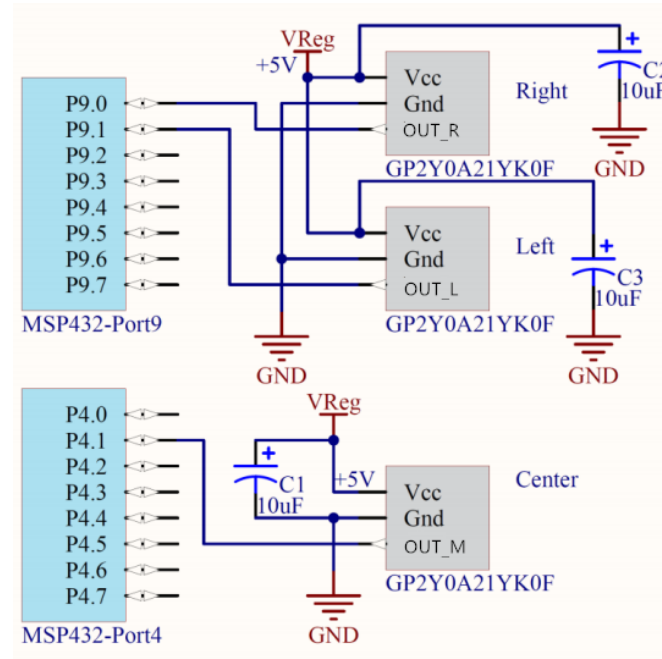


图 6. 红外传感器的一个可能的接口电路。

即使传感器采用 5 V 电源供电，输出也只有 0 到 3.1 V，见图 2。因此，将此信号连接到 3.3 V 供电的 MSP432 是安全的。

注：必须使用 0 至 3.3V ADC 范围，不要使用 2.5 V 的精密内部参考电压。

作为一种选择，您可以构建三个模拟低通滤波器（LPF）并将它们放置在传感器和 ADC 之间。如果采样频率为 1000 Hz，则模拟 LPF 的截止频率应约为 100 Hz。为此，您需要运算放大器来设计 LPF 滤波器，并且需要一个面包板，这些组件尚未包含在实验中。

8.6 红外测距实验步骤

8.6.1 探索 ADC，发现中央极限定理



实验：ADC 数据采集系统

在本节中，我们将探讨 ADC 如何使用 TI 的 Launchpad 工作。您将使用电源。将大约 3 V（任何 2.5 到 3.1V 的值）的电压连接到 P4.7。P4.7 是 ADC 通道 6。构建，调试和运行项目 ADCSWTrigger。该项目使用 SysTick 中断以 1000 Hz 的频率对 P4.7 进行采样，实现简单的平均数字滤波器，并对采集的数据进行统计分析。特别来说，它会计算 PMF（噪声的概率分布），平均值（ μ ），范围（max-min），方差（ σ^2 ）和标准偏差（ σ ）。如果您运行 PuTTY 或 TExaSdisplay 等终端模拟器，则可以看到此统计分析的输出。

注：或者，如果已将 OLED 连接到机器人，则将这些参数输出到 OLED 将简化测试。

在 P4.7 输入上放置一个电压表，观察真实电压。将真实电压与 ADC 数字输出进行比较，可以了解 ADC 的工作原理。假设没有噪声并且输入是恒定的，那么您可能希望所有 ADC 样本相等。样本不相同的事实是噪声的原因。没有噪声，方差和标准偏差将为零。变异系数（coefficient of variation-CV）是标准差除以平均值（ μ ），

$$CV = \sigma/\mu$$

1 / CV 是对信噪比（signal to noise ratio -SNR）的简单估算。当输入电压约为 3 V 时，我们将系统的精度近似为

$$\log_2(\mu/\sigma)$$

该项目还实现了一个简单的数字滤波器。此过滤器计算最后 N 个样本的平均值。

$$y(n) = (x(n)+x(n-1)+...+x(n-N-1))/N$$

平均法是一种提高信噪比的简单方法。在此项目中，N 值在变量 Size 中定义，从 N = 1 到 512。通过按下并释放任一 LaunchPad 开关，软件循环通过 10 个 N 的值。当输入电压在 3V 左右时，收集 1 / CV（SNR）和 $\log_2(\mu/\sigma)$ 数据就是 N = 1, 2, 4, ... 和 512 的功能。你观察到了什么？

接下来查看概率和统计学课程中的中央极限定理（Central Limit Theorem - CLT）。查找假，以了解 CLT 是否适用于这些测量。CLT 指出，当添加独立的随机变量时，它们的总和倾向于正态或高斯分布。在这个实验中，您应该发现，随着 N 的增加，PMF 从具有多个峰值变为仅具有一个峰值（参见讲解幻灯片）。当研究来自 IR 距离传感器的噪声时，这种行为将更加明显。

8.6.2 研究数字滤波器（可选）

如果您想了解有关简单平均滤波器的更多信息，请打开电子表格 FIR_Digital_LowPassFilter.xls（当您打开 zip 文件时，您应该在文件夹中有这个）。您可以更改采样率（fs）和滤波器大小（N），并可视化频率和步骤响应。您可以调整的两个参数以黄色突出显示。如果采样率为 2000 Hz，大小 N 为 64，则滤波器的截止频率（cutoff frequency- fc）为 16 Hz，见图 7。

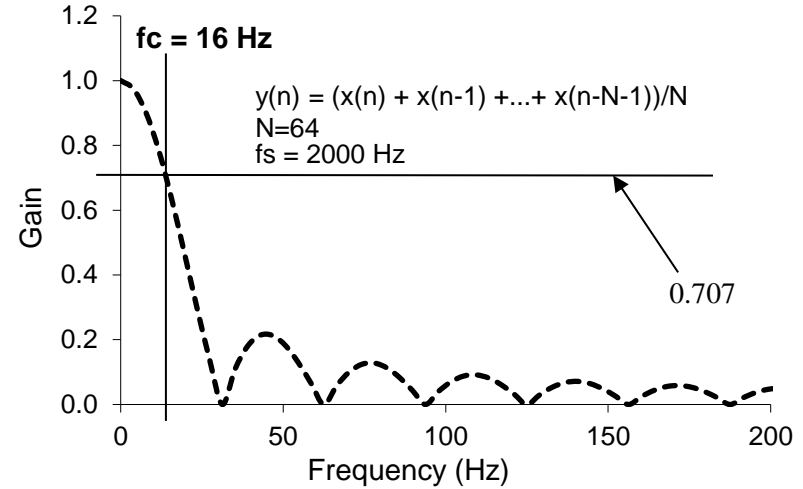


图 7. N = 64 的平均滤波器的频率响应。

8.6.3 低级别 ADC 软件驱动程序

第一个软件步骤是编写两个函数，对来自中心红外测距传感器的模拟信号进行采样。这些功能的原型是

```
void ADC0_InitSWTriggerCh12(void); // initialize P4.1, channel A12
uint32_t ADC_In12(void); // sample P4.1, channel A12
```

基本上，您将把通道 6（P4.7）的初始化和采样函数转换为通道 12（P4.1），使所有设计决策保持不变，配置如下：

- 单通道
- 软件启动



实验：ADC 数据采集系统

- 忙等待同步
- 14 位无符号二进制
- 3.3V V(R+), 模拟输入范围为 0 至 3.3V
- ADC14MEM0 地址

注：如果不阅读 MSP432 数据表，您将无法完成本实验。查看 ADC14 的章节，逐行浏览现有的 ADC0_InitSWTriggerCh6 和 ADC_In6 函数。这两个函数有效，但您需要通过查找它访问的每个寄存器来理解每一行。了解每一行后，您就可以将其从采样通道 6 转换为采样通道 12。

要测试这些功能，您可以运行 **Program15_1**。ISR 采样通道 12，运行平均数字低通滤波器，并通过邮箱（变量和信号量）将数据传递到另一个线程。

```
void Program15_1_ISR(void) { // runs at 2000 Hz
  uint32_t RawADC;
  P1OUT ^= 0x01; // profile
  P1OUT ^= 0x01; // profile
  RawADC = ADC_In12(); // sample P4.1/channel 12
  ADCvalue = LPF_Calc(RawADC);
  ADCflag = 1; // semaphore
  P1OUT ^= 0x01; // profile
}
```

8.6.4 红外测距传感器的信噪比

要分析传感器噪声，可以使用类似于项目 **ADCSWTrigger** 的 **Program15_1**，将所有通道 6 访问替换到通道 12。运行 **Program15_1** 并确定各种大小的平均滤波器的 SNR，从 **N = 32** 到 **512**。

低通 FIR $y(n) = (x(n)+x(n-1) + \dots + x(n-N-1))/N$

在确定平均值的大小时，还要考虑阶跃响应。换句话说，让输入从 0 变为 1，并计算滤波器的输出作为时间的函数，假设采样率为 2000 Hz。计算滤波器的时间常数，定义为通过改变输入，使输出的新值变为原值的 63% ($1-e^{-1}$) 所需的时间。FIR 滤波器的时间常数为 20 ms，请参见图 8。为机器人选择 N 值。

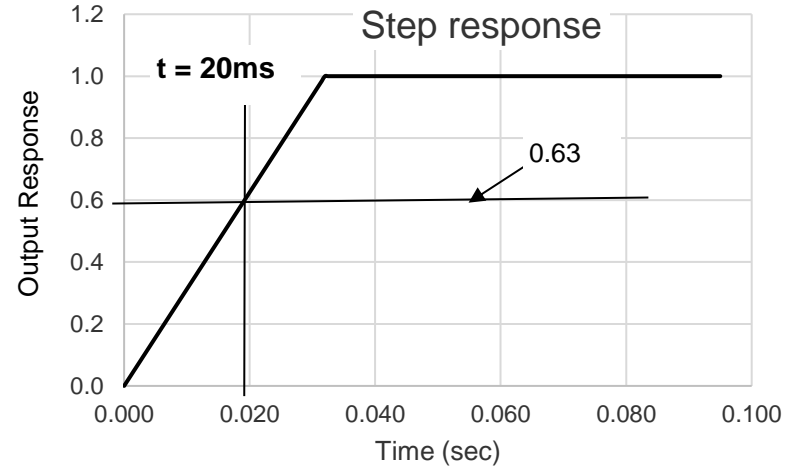


图 8. N = 64 的平均滤波器的阶跃响应。

注：由于电机的时间常数约为 100ms，我们希望滤波器的时间常数小于 100ms。

如果您有频谱分析仪的使用权，那么观察频域中的噪声非常有趣。图 9 说明整个频率都有明显的噪声，峰值为 1kHz 的倍数。频谱分析仪的输出以分贝满量程给出。图 9 中的频谱分析仪具有 5V 的满量程，因此

$$dB_{FS} = 20 \log_{10}(V/5)$$

1 kHz, -35 dB 的噪声相当于约 90 mV。在 MSP432 上，90 mV 的噪声会将系统的精度从 ADC 的 14 位降低到 $\log_2(3.3V / 0.09V)$ ，大约为 5 位。数字滤波器的目的是消除一些噪声，并提高精度。



实验：ADC 数据采集系统

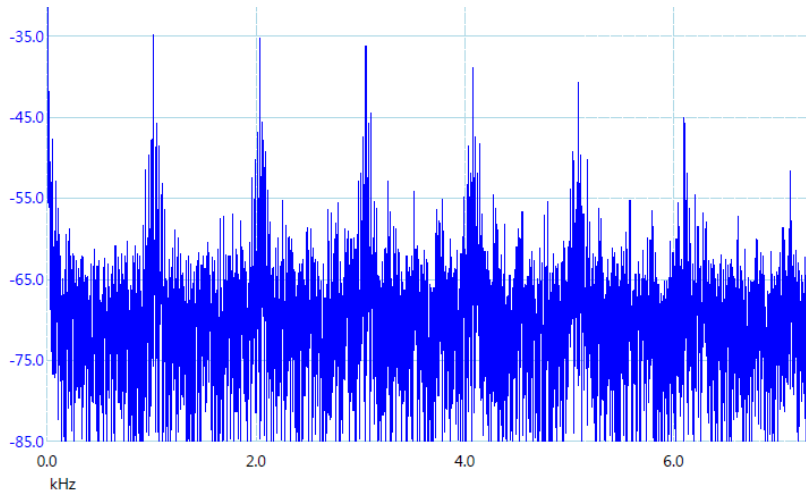


图9.距离传感器输出的频谱（无模拟滤波器）。

8.6.5 三通道 ADC 软件驱动程序

下一个软件步骤是编写两个函数，对来自传感器的所有三个模拟信号进行采样。您需要制作三个数字低通滤波器副本，以便过滤所有通道。你的函数的原型是

```
void ADC0_InitSWTriggerCh17_12_16 (void);
void ADC_In17_12_16(uint32_t *ch17, uint32_t *ch12, uint32_t *ch16);
```

基本上，您将把通道 6 和 7 的初始化和功能转换为通道 12（P4.1），多数的设计决策不做改变。

- 三通道采样
- 软件启动
- 忙等待同步
- 14 位无符号二进制
- 3.3V V(R+), 模拟输入范围为 0 至 3.3V
- ADC14MEM2, ADC14MEM3, ADC14MEM4 地址

要测试这些功能，您可以运行 **Program15_2**。ISR 对三个通道进行采样，运行三个平均数字低通滤波器，并将数据通过邮箱（变量和信号量）传递到另一个线程。

注：同样，在查看现有的 ADC0_InitSWTriggerCh67 和 ADC_In67 函数时，必须阅读 MSP432 数据手册。这两个功能可以工作，但您需要通过查找它访问的每个

寄存器来理解每一行。理解每一行后，您就可以将其从采样通道 6 和 7 转换为采样通道 17, 12 和 16。

```
volatile uint32_t nr,nc,nl;
void Program15_2_ISR(void){ // runs at 2000 Hz
    uint32_t raw17,raw12,raw16;
    P1OUT ^= 0x01; // profile
    P1OUT ^= 0x01; // profile
    ADC_In17_12_16(&raw17,&raw12,&raw16); // sample
    nr = LPF_Calc(raw17); // right is channel 17 P9.0
    nc = LPF_Calc2(raw12); // center is channel 12, P4.1
    nl = LPF_Calc3(raw16); // left is channel 16, P9.1
    ADCflag = 1; // semaphore
    P1OUT ^= 0x01; // profile
}
int Program15_2(void){ // example program 15.2
    uint32_t raw17,raw12,raw16; int32_t n; uint32_t s;
    Clock_Init48MHz();
    ADCflag = 0; s = 256; // replace with your choice
    ADC0_InitSWTriggerCh17_12_16(); // initialize
    ADC_In17_12_16(&raw17,&raw12,&raw16); // sample
    LPF_Init(raw17,s); // P9.0/channel 17
    LPF_Init2(raw12,s); // P4.1/channel 12
    LPF_Init3(raw16,s); // P9.1/channel 16
    UART0_Init(); // initialize UART0
    LaunchPad_Init();
    TimerA1_Init(&Program15_2_ISR,250); // 2000 Hz
    UART0_OutString("Program 15.2 \n");
    EnableInterrupts();
    while(1){
        for(n=0; n<2000; n++){
            while(ADCflag == 0){};
            ADCflag = 0; // show every 2000th point
        }
        UART0_OutUDec5(nl);UART0_OutUDec5(LeftConvert(nl));
        UART0_OutUDec5(nc);UART0_OutUDec5(CenterConvert(nc));
        UART0_OutUDec5(nr);UART0_OutUDec5(RightConvert(nr));
        UART0_OutChar('\n'); // once a second
    }
}
```




实验：ADC 数据采集系统

将示波器连接到 P1.0，并测量中断之间以及 ISR 之间的时间。图 9 显示该系统（Size = 256）每次在 ISR 中执行 25µs。在 2 kHz 时，ADC 采样和数字滤波消耗 $25/500 = 0.05$ （5%）的处理器时间。

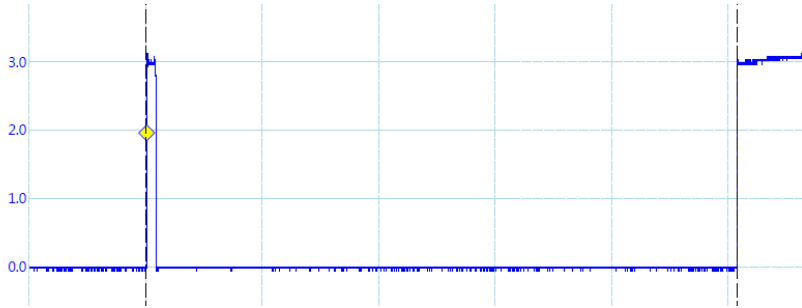


图 9. 线程配置文件。范围附于 P1.0。时间刻度为每格 5µs。

8.6.6 校准和准确性

实现三个转换功能，首先使用 Program15_2 进行校准，然后测试这些功能。准确定义要设置参考点的机器人的位置，请参见图 4。使用标尺测量真实距离（ D_r ， D_c ， D_l ），并使用程序 Program15_2 显示原始 ADC 值（ n_r ， n_c 和 n_l ）。每个传感器收集大约 10 个点，并拟合数据以找到每个传感器的校准系数。将校准限制在距离传感器 70 mm 和 800 mm 之间的距离内。

在软件中输入系数，然后重复该过程，为每个传感器收集另外一组 10 个测量值。计算每个传感器的满量程的平均精度，以百分比为单位。

8.6.7 发现奈奎斯特理论

奈奎斯特理论指出，如果以 f_s 的频率对信号进行采样，则数字样本仅包含 0 到 $1/2 f_s$ 的频率分量。相反，如果模拟信号确实包含大于 $1/2 f_s$ 的频率分量，则在采样过程中会出现混叠误差。混叠是指数字信号的频率与原始模拟信号的频率不同。

虽然 ADC 以 2000 Hz 采样，但由于 Program15_2 每秒输出一次，因此可以认为在终端程序上观察到的数据已经以 1 Hz 的频率进行采样。

1) 观察一个传感器输出，以 4 到 10 秒的周期，将墙壁（木块）从传感器摆动 100 到 200 毫米。请注意，数据以一种可以跟踪振荡的频率和振幅的方式跟踪信号。

2) 需要非常小心地尝试以恒定的振幅，0.5 Hz（周期为 2 秒）摆动墙壁。在此频率下，采样数据将振荡 100, 200, 100, 200, 100... 这是奈奎斯特频率（ $1/2 f_s$ ），系统在该频率处从工作区域（能够恢复振幅和频率）过渡到无法使用数字数据恢复振荡的幅度和频率的区域。

3) 最后，以恒定的振幅振荡墙壁，但频率远高于 0.5 Hz。存在于高于 $1/2 f_s$ 的频率的数据将被混叠（频率折叠为 0 到 0.5Hz），并且数字数据不能用于恢复振荡的振幅和频率。混叠的问题是高频噪声将表现为低频信号。因此，我们必须使用模拟低通滤波器消除高于或等于 $1/2 f_s$ 的高幅度信号。

8.7 疑难解答

红外测距传感器不起作用：

- 检查接线，如图 6 所示
- 使用电压表直接观察传感器上的电源（+ 5V），接地和信号

ADC 不起作用：

- 运行 ADCSWTrigger。该项目应正确地对通道 6 进行采样
- 查看数据表并仔细检查软件访问的每个寄存器

ISR 执行时间超过 25us：

- 请注意，此滤波器的实现需要一个大约 9us 的通道，和三个 25us 的通道。这是因为每个滤波器计算需要一次减法，一次加法和一次除法。
- 确保 ISR 中没有环路（ADC 采样中的忙等待除外）。

统计计算不正确：

- 查看数组 Data [N] 中收集的数据。错误的统计信息可能是错误数据的结果。
- 您可以将统计数组减少到 $N = 8$ ，并执行手动计算的统计检查软件。
- 如果数据非常嘈杂， $100 * Sum2$ 可能会溢出。



实验：ADC 数据采集系统

8.8 请思考

在本节中，我们列出了完成本实验后要考虑的思考问题。这些问题旨在测试您对本实验中概念的理解。

- ADC 输入电压和数字输出数之间的数学关系是什么？
- 该系统中限制距离测量的分辨率和精度的限制因素是什么？
- 为什么函数 `ADC_In17_12_16` 使用引用参数传递调用？
- 当平均滤波器的大小加倍时会发生什么？
- 为什么本实验中需要中断？即，中断使我们能做什么？
- 实验中如何使用邮箱？`ADCflag = 0` 是什么意思？`ADCflag = 1` 是什么意思？
- 如果 `ADCflag` 已经为 1 时 ISR 试图将其再次设置为 1，那意味着什么？

8.9 其它挑战

在本节中，我们列出了您可以执行的其它活动，以进一步探索此模块的概念。您可以扩展系统或提出完全不同的东西。例如，

- 如果在传感器输出和 ADC 输入 ($f_c = 100 \text{ Hz}$) 之间添加三个模拟滤波器，则可以大大降低噪声，还可以降低数字滤波器的采样频率和大小。
- 中值滤波器是一个可替代的数字滤波器，用于提高信噪比。
- 如果您执行了实验 7 (OLED)，则可以将数据输出到 OLED，从而更易于调试，校准和测试。

8.10 接下来是哪些模块？

这是我们在本课程中多次使用中断的方法。以下模块将基于此模块构建：

模块 10) 实现 SysTick 周期中断，使用中断实现多线程。

8.11 您应该已经学会

在本节中，我们将回顾您应该在本单元中学到的重要概念如下：

- 使用周期性中断来实现采样
- 使用 ADC 将模拟域转换为数字域
- 噪音是难以解决的重要问题；在以恒定电压连接 LaunchPad 的条件下，噪声将 14 位 ADC 限制为 10 或 11 位；噪声通常是分辨率的限制因素，而不是 ADC 中的位数
- 软件可以高效地实现过滤
- 软件可以有效地处理非线性（双曲线）传感器
- 准确性取决于两个过程：分辨率和校准。分辨率取决于噪声，校准取决于传感器的稳定性。