

利用 3 轴数字加速度计实现功能全面的计步器设计

作者: Neil Zhao

简介

计步器是一种颇受欢迎的日常锻炼进度监控器,可以激励人们挑战自己,增强体质,帮助瘦身。早期设计利用加重的机械开关检测步伐,并带有一个简单的计数器。晃动这些装置时,可以听到有一个金属球来回滑动,或者一个摆锤左右摆动敲击挡块。

如今,先进的计步器利用MEMS(微机电系统)惯性传感器和复杂的软件来精确检测真实的步伐。MEMS惯性传感器可以更准确地检测步伐,误检率更低。MEMS惯性传感器具有低成本、小尺寸和低功耗的特点,因此越来越多的便携式消费电子设备开始集成计步器功能,如音乐播放器和手机等。ADI公司的3轴加速度计ADXL335、ADXL345和ADXL346小巧纤薄,功耗极低,非常适合这种应用。

本文以对步伐特征的研究为基础,描述一个采用3轴加速度计ADXL345的全功能计步器参考设计,它能辨别并计数步伐,测量距离、速度甚至所消耗的卡路里。

ADXL345 专有的(正在申请专利)片内32级先进先出(FIFO)缓冲器可以存储数据,并执行计步器应用的相关操作,从而最大程度地减少主处理器干预,为便携式设备节省宝贵的系统功率。其13位分辨率(4 mg/LSB)甚至允许计步器以合理的精度测量超低速步行(每步加速度变化约55 mg)。

了解模型

在可用于分析跑步或步行的特征当中,我们选择“加速度”作为相关参数。个体(及其相关轴)的运动包括三个分量,分别是前向(“滚动”)、竖向(“偏航”)和侧向(“俯仰”),如图1所示。ADXL345检测其三个轴——x、y和z上的加速度。计

步器处于未知方向,因此测量精度不应严重依赖于运动轴与加速度计测量轴之间的关系。

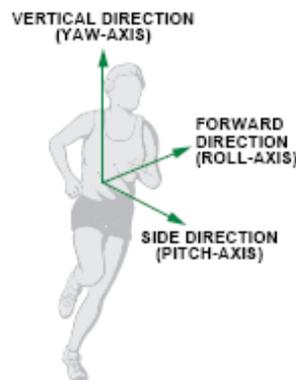


图1. 各轴的定义

让我们考虑步行的特性。图2描绘了一个步伐,我们将其定义为单位步行周期,图中显示了步行周期各阶段与竖向和前向加速度变化之间的关系。

图3显示了与一名跑步者的竖向、前向和侧向加速度相对应的x、y和z轴测量结果的典型图样。无论如何穿戴计步器,总有至少一个轴具有相对较大的周期性加速度变化,因此峰值检测和针对所有三个轴上的加速度的动态阈值决策算法对于检测单位步行或跑步周期至关重要。

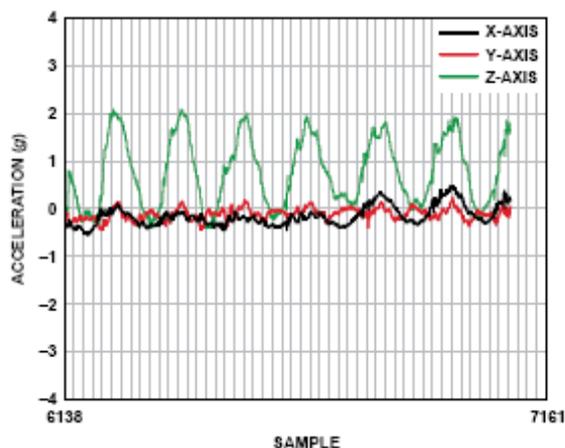


图3. 从一名跑步者测得的x、y和z轴加速度的典型图样

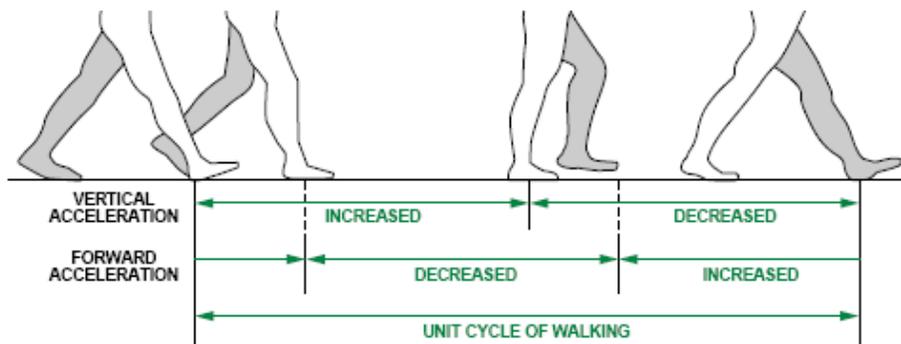


图2. 步行阶段与加速度模式

算法

步伐参数

数字滤波器: 首先,为使图3所示的信号波形变得平滑,需要一个数字滤波器。可以使用四个寄存器和一个求和单元,如图4所示。当然,可以使用更多寄存器以使加速度数据更加平滑,但响应时间会变慢。

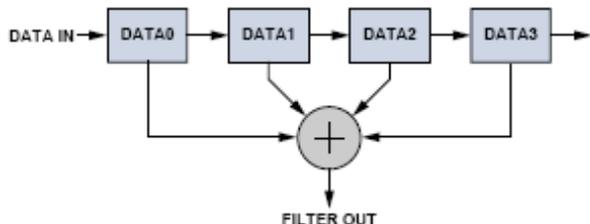


图4. 数字滤波器

图5显示了来自一名步行者所戴计步器的最活跃轴的滤波数据。对于跑步者,峰峰值会更高。

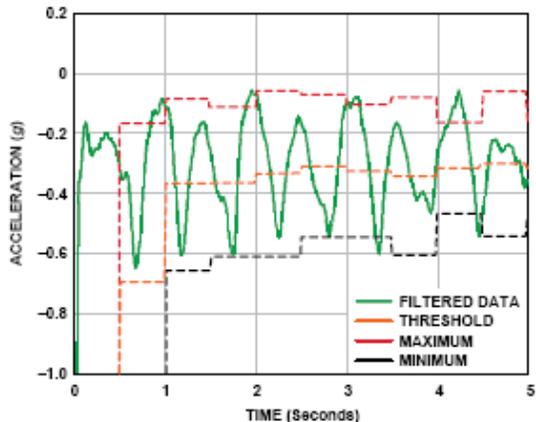


图5. 最活跃轴的滤波数据

动态阈值和动态精度: 系统持续更新3轴加速度的最大值和最小值,每采样50次更新一次。平均值(Max + Min)/2称为“动态阈值”。接下来的50次采样利用此阈值判断个体是否迈出步伐。

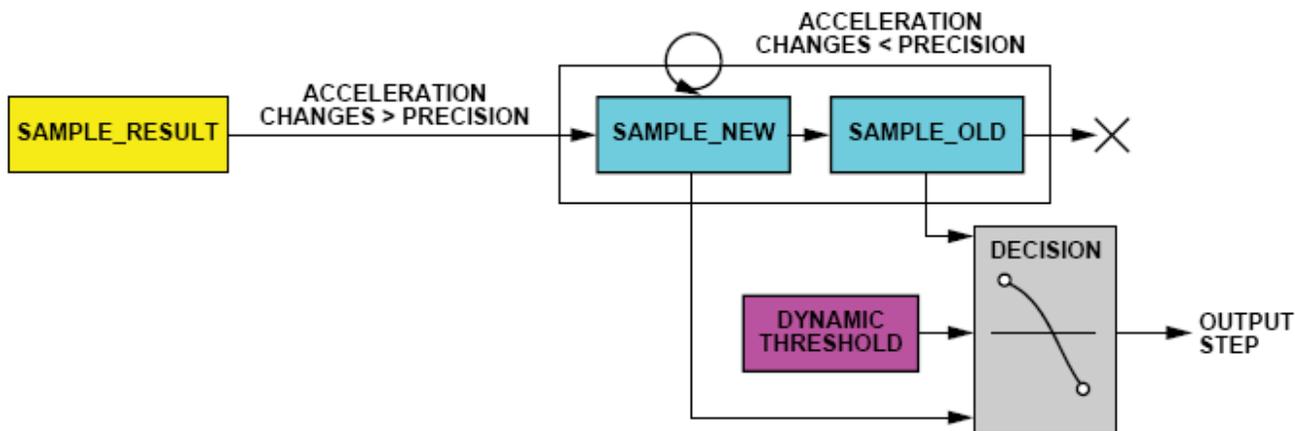


图6. 动态阈值和动态精度

由于此阈值每50次采样更新一次,因此它是动态的。这种选择具有自适应性,并且足够快。除动态阈值外,还利用动态精度来执行进一步滤波,如图6所示。

利用一个线性移位寄存器和动态阈值判断个体是否有效地迈出一步。该线性移位寄存器含有2个寄存器:sample_new寄存器和sample_old寄存器。这些寄存器中的数据分别称为sample_new和sample_old。当新采样数据到来时,sample_new无条件移入sample_old寄存器。然而,sample_result是否移入sample_new寄存器取决于下述条件:如果加速度变化大于预定义精度,则最新的采样结果sample_result移入sample_new寄存器,否则sample_new寄存器保持不变。因此,移位寄存器组可以消除高频噪声,从而保证结果更加精确。

步伐迈出的条件定义为:当加速度曲线跨过动态阈值下方时,加速度曲线的斜率为负值($sample_new < sample_old$)。

峰值检测:步伐计数器根据x、y、z三轴中加速度变化最大的一个轴计算步数。如果加速度变化太小,步伐计数器将忽略。

步伐计数器利用此算法可以很好地工作,但有时显得太敏感。当计步器因为步行或跑步之外的原因而非常迅速或非常缓慢地振动时,步伐计数器也会认为它是步伐。为了找到真正的有节奏的步伐,必须排除这种无效振动。利用“时间窗口”和“计数规则”可以解决这个问题。

“时间窗口”用于排除无效振动。假设人们最快的跑步速度为每秒5步,最慢的步行速度为每2秒1步。这样,两个有效步伐的时间间隔在时间窗口[0.2 s - 2.0 s]之内,时间间隔超出该时间窗口的所有步伐都应被排除。

ADXL345的用户可选输出数据速率特性有助于实现时间窗口。表1列出了 $T_A = 25^\circ\text{C}$ 、 $V_S = 2.5\text{ V}$ 、 $V_{DDIO} = 1.8\text{ V}$ 时的可配置数据速率(以及功耗)。

表 1. 数据速率和功耗

输出数据 速率(Hz)	带宽 (Hz)	速率 代码	I _{DD} (μA)
3200	1600	1111	146
1600	800	1110	100
800	400	1101	145
400	200	1100	145
200	100	1011	145
100	50	1010	145
50	25	1001	100
25	12.5	1000	65
12.5	6.25	0111	55
6.25	3.125	0110	40

此算法使用 50 Hz 数据速率(20 ms)。采用 interval 的寄存器记录两步之间的数据更新次数。如果间隔值在 10 与 100 之间，则说明两步之间的时间在有效窗口之内；否则，时间间隔在时间窗口之外，步伐无效。

“计数规则”用于确定步伐是否是一个节奏模式的一部分。步伐计数器有两个工作状态：搜索规则和确认规则。步伐计数器以搜索规则模式开始工作。假设经过四个连续有效步伐之后，发现存在某种规则(in regulation), 那么步伐计数器就会刷新和显示结果，并进入“确认规则”工作模式。在这种模式下工作时，每经过一个有效步伐，步伐计数器就会更新一次。但是，如果发现哪怕一个无效步伐，步伐计数器就会返回搜索规则模式，重新搜索四个连续有效步伐。

图 7 显示了步伐参数的算法流程图。

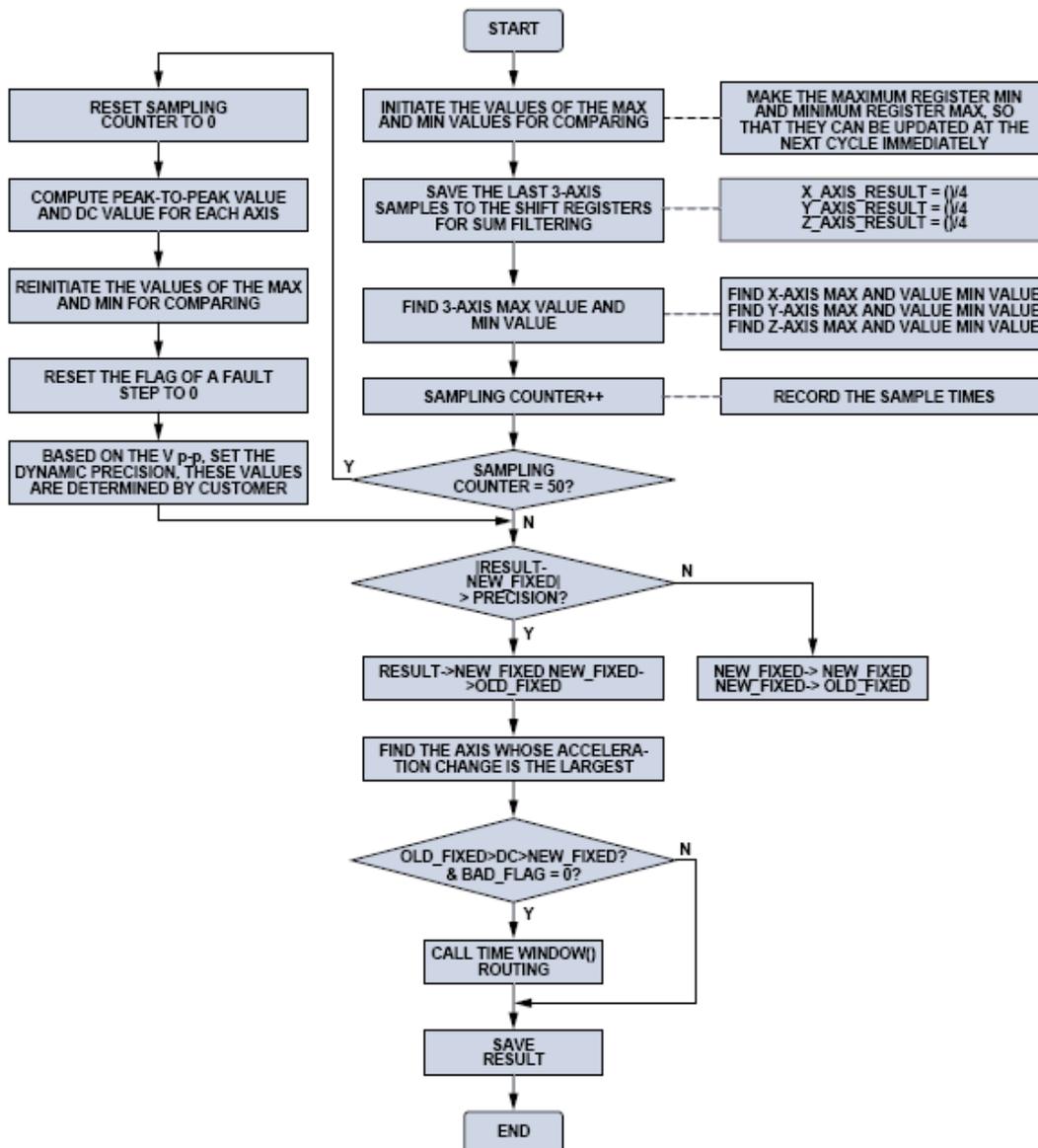


图 7. 步伐参数算法流程图

距离参数

根据上述算法计算步伐参数之后,我们可以使用公式 1 获得距离参数。

$$\text{距离} = \text{步数} \times \text{每步距离} \quad (1)$$

每步距离取决于用户的速度和身高。如果用户身材较高或以较快速度跑步,步长就会较长。参考设计每 2 秒更新一次距离、速度和卡路里参数。因此,我们使用每 2 秒计数到的步数判断当前跨步长度。表 2 显示了用于判断当前跨步长度的实验数据。

表 2. 跨步长度与速度 (每 2 秒步数) 和身高的关系

每 2 秒步数	跨步(m/s)
0~2	身高/5
2~3	身高/4
3~4	身高/3
4~5	身高/2
5~6	身高/1.2
6~8	身高
>=8	1.2 × 身高

2 秒的时间间隔可以利用采样数精确算出。以 50 Hz 数据速率为例,处理器可以每 100 次采样发送一次相应的指令。处理器利用一个名为 m_nLastPedometer 的变量记录每个 2 秒间隔开始时的步数,并利用一个名为 m_nPedometerValue 的变量记录每个 2 秒间隔结束时的步数。这样,每 2 秒步数等于 m_nPedometerValue 与 m_nLastPedometer 之差。

虽然数据速率为 50 Hz,但 ADXL345 的片内 FIFO 使得处理器无需每 20 ms 读取一次数据,极大地减轻了主处理器的负担。该缓冲器支持四种工作模式:旁路、FIFO、流和触发。在 FIFO 模式下,x、y、z 轴的测量数据存储在 FIFO 中。当 FIFO 中的采样数与 FIFO_CTL 寄存器采样数位规定的数量相等时,水印中断置 1。如前所述,人们的跑步速度最快可达每秒 5 步,因此每 0.2 秒刷新一次结果即可保证实时显示,从而处理器只需每 0.2 秒通过水印中断唤醒一次并从 ADXL345 读取数据。FIFO 的其它功能也都非常有用。利用触发模式,FIFO 可以告诉我们中断之前发生了什么。由于所述解决方案没有使用 FIFO 的其它功能,因此笔者将不展开讨论。

速度参数

速度 = 距离/时间,而每 2 秒步数和跨步长度均可根据上述算法计算,因此可以使用公式 2 获得速度参数。

$$\text{速度} = \text{每 2 秒步数} \times \text{跨步}/2s \quad (2)$$

卡路里参数

我们无法精确计算卡路里的消耗速率。决定其消耗速率的一些因素包括体重、健身强度、运动水平和新陈代谢。不过,我们可以使用常规近似法进行估计。表 3 显示了卡路里消耗与跑步速度的典型关系。

表 3. 卡路里消耗与跑步速度的关系

跑步速度(km/h)	卡路里消耗(C/kg/h)
8	10
12	15
16	20
20	25

由表 3 可以得到公式(3)。

$$\text{卡路里}(C/kg/h) = 1.25 \times \text{跑步速度}(km/h) \quad (3)$$

以上所用的速度参数单位为 m/s,将 km/h 转换为 m/s 可得公式 4。

$$\begin{aligned} \text{卡路里}(C/kg/h) &= 1.25 \times \text{速度}(m/s) \times 3600/1000 \\ &= 4.5 \times \text{速度}(m/s) \end{aligned} \quad (4)$$

卡路里参数随同距离和速度参数每 2 秒更新一次。为了考虑运动者的体重,我们可以将公式 4 转换为公式 5。体重(kg)为用户输入量,一个小时等于 1800 个 2 秒间隔。

$$\begin{aligned} \text{卡路里}(C/2s) &= 4.5 \times \text{速度} \times \text{体重}/1800 \\ &= \text{速度} \times \text{体重}/400 \end{aligned} \quad (5)$$

如果用户在步行或跑步之后休息,则步数和距离将不变化,速度应为 0,此时的卡路里消耗可以利用公式 6 计算(休息时的卡路里消耗约为 1 C/kg/h)。

$$\text{卡路里}(C/2s) = 1 \times \text{体重}/1800 \quad (6)$$

最后,我们可以将所有 2 秒间隔的卡路里相加,获得总卡路里消耗量。

硬件连接

ADXL345 易于连接到任何使用 I²C[®]或 SPI 数字通信协议的处理器。图 8 给出了演示设备的原理示意图,它采用 3V 电池供电。ADXL345 的/CS 引脚连接到板上的 VS,以选择 I²C 模式。利用一个低成本精密模拟微控制器 ADuC7024 从 ADXL345 读取数据,执行算法,并通过 UART 将结果发送至 PC。SDA 和 SCL 分别为 I²C 总线的数据和时钟引脚,从 ADXL345 连接到 ADuC7024 的对应引脚。ADXL345 的两个中断引脚连接到 ADuC7024 的 IRQ 输入,以产生各种中断信号并唤醒处理器。

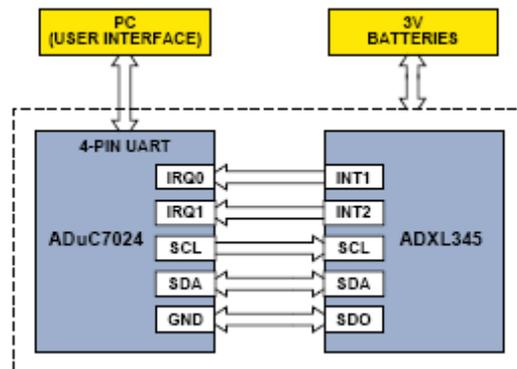


图 8. 硬件系统的原理示意图

用户界面

用户界面显示测试数据，并对操作员的指令做出响应。用户界面(UI)运行之后，串行端口应打开，通信链路应启动，随后演示程序将持续运行。图9显示了用户佩戴计步器步行或跑步时的测试情况。用户可以输入其体重和身高数据，距离、速度和卡路里参数将根据这些数据进行计算。



图9. 用户佩戴计步器步行或跑步时的测试情况

结论

ADXL345 是一款出色的加速度计，非常适合计步器应用。它具有小巧纤薄的特点，采用 3 mm × 5 mm × 0.95 mm 塑封封装，利用它开发的计步器已经出现在医疗仪器和高档消费电子设备中。它在测量模式下的功耗仅 40 μA，待机模式下为 0.1 μA，堪称电池供电产品的理想之选。嵌入式 FIFO 极大地减轻了主处理器的负荷，使功耗显著降低。此外，可以利用可选的输出数据速率进行定时，从而取代处理器中的定时器。13 位分辨率可以检测非常小的峰峰值变化，为开发高精度计步器创造了条件。最后，它具有三轴输出功能，结合上述算法，用户可以将计步器戴在身上几乎任何部位。

几点建议：如果应用对成本极其敏感，或者模拟输出加速度计更适合，建议使用 ADXL335，它是一款完整的小尺寸、薄型、低功耗、三轴加速度计，提供经过信号调理的电压输出。如果 PCB 尺寸至关重要，建议使用 ADXL346，这款低功耗器件的内置功能甚至比 ADXL345 还多，采用小巧纤薄的 3 mm × 3 mm × 0.95 mm 塑封封装，电源电压范围为 1.7 V 至 2.75 V。

致谢

本文借鉴了 Charles Lee 和 Harvey Weinberg 二位的技术经验，笔者对此表示感谢。

参考文献

1. Data sheets and additional product information on all Analog Devices products can be found at www.analog.com.
2. <http://www.analog.com/zh/mems/low-g-accelerometers/products/index.html>

作者简介

Neil Zhao [neil.zhao@analog.com] 是 ADI 中国应用支持部门的一名现场应用工程师，在 ADI 有两年多的工作经历。他负责为 ADI 中国的核心产品和技术部门提供技术支持工作。2008 年 1 月，Neil 毕业于北京航空航天大学，并获得通信与信息系统硕士学位。

