

## Application Note

## 将 3D 线性霍尔效应传感器用于操纵杆按钮按下操作



Yishan Chen

## 摘要

本应用手册提出了 Z 轴中的两级磁通变化和锁存器检测方法，该方法使用 3D 线性霍尔效应传感器来减少按下操纵杆按钮时可能出现的 X 或 Y 偏移。通过使用硬件中断和软件转换率或绝对值检测方法，可以快速响应 Z 轴按下操作。同时，通过锁存最后一个 X、Y 转换数，该方法可以显著减少 X 和 Y 偏移。受机械误差影响最大的轴的平均误差可从 265% 降至 8.8%。

## 内容

1 简介.....	2
2 3D 线性霍尔传感器中的 Z 轴按下偏移问题.....	4
2.1 Z 轴按下操作中 X、Y 偏移的根本原因.....	4
3 Z 轴按下检测方法.....	5
3.1 建议方法的大致介绍.....	5
3.2 软件转换率检测.....	5
3.3 硬件阈值检测和中断.....	6
3.4 锁存方法.....	6
3.5 测试结果.....	8
4 总结.....	10
5 参考资料.....	11

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

在游戏控制器、遥控器或云台相机等操纵杆应用中，需要传感器元件或器件来检测操纵杆的移动。传感器将原始机械位移信号转换为电信号，并与主机 MCU 通信以更新感应电信号。然后，通过利用来自传感器的信息，MCU 提供对更大型系统的用户控制。

5D 开关和碳膜电阻器操纵杆均已用作操纵杆应用中的直接机械接触检测方法。

5D 开关在操纵杆周围设置了 5 个机械触发器。当机械结构按下或由操纵杆移动触发时，连续高电平信号从开关输出，以指示移动的方向。该方法只能输出高电平或低电平信号，无法检测倾斜角或移动速度，因而无法提供更精确的检测。

碳膜电阻器操纵杆会改变每个轴相对于操纵杆移动的电阻。碳膜具有良好的线性响应，但这需要更大的机械封装，经常使用会导致电阻变化，引起操纵杆漂移问题，从而限制产品寿命。



图 1-1. 碳膜电阻器操纵杆和 5D 开关操纵杆

最近，从基于机械接触的设计转向基于霍尔效应的设计受到越来越多的关注，后者提供免接触式位置感应，并帮助解决在产品寿命期间出现的漂移问题。根据操纵杆设计，标准 1D（单轴灵敏度）和 3D（x、y、z 灵敏度）均可用于实现此目的。

3D 霍尔效应传感器采用单个塑料封装，将三个霍尔元件集成到一个芯片中，尺寸超小并且成本低，同时保持良好的性能设计。TI 新一代 3D 线性霍尔传感器 [TMAG3001](#) 的尺寸可实现 0.83mm x 1.32mm 的封装尺寸。

[采用霍尔效应传感器的操纵杆和控制杆设计](#)应用手册中详细介绍了使用霍尔效应传感器的操纵杆配置。

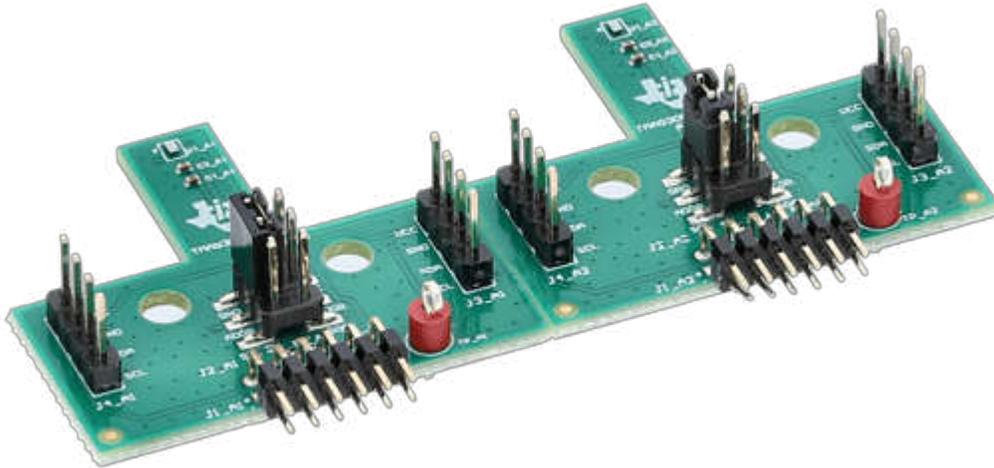


图 1-2. TI TMAG3001 EVM

在操纵杆应用中，单个 3D 线性霍尔效应传感器可用于替代碳膜或 5D 机械开关。如 [3D 霍尔效应传感器简介](#) 中所述，霍尔效应元件以彼此正交的方式排列，这样可以检测整个磁场。通过使用 TMAG3001 集成 CORDIC 引擎输出的角度计算，主机 MCU 可以快速确定操纵杆的位置。除了能够跟踪 XY 角度输入，使用 3D 霍尔效应传感器还可以通过捕获磁场矢量的幅度阶跃来实现按钮按下检测。

## 2 3D 线性霍尔传感器中的 Z 轴按下偏移问题

在操纵杆应用中，用户经常在 Z 轴方向按下操纵杆来启用按钮按下操作。按下后，用户能够指示单个操作。例如，在云台相机中，该操作可以启用命令 *开始录制* 或 *拍照*，而在游戏控制器中，该操作也可视为 *确认*。如果在按下操作期间 X 和 Y 轴出现了一些偏移且这些偏移被发送到 MCU，该错误信息可能会引起意外移动，如云台相机屏幕中心点转移或菜单命令错误。

### 2.1 Z 轴按下操作中 X、Y 偏移的根本原因

图 2-1 显示了 Z 轴按下操作期间的设计行为。

- 3D 线性霍尔传感器的中心点与操纵杆之间没有机械误差。
- 按下操作始终保持垂直角度

请注意，3D 线性霍尔效应传感器内的霍尔元件不在 TMAG3001 的中点。这需要从封装中心小幅偏移才能正确对齐器件。

通过 TI 磁感应仿真器 (TIMSS) 仿真，可对预期的磁场建模并将其用于执行计算。如果磁体向下移动，X 和 Y 方向的磁通不会发生变化，Z 轴的磁通可能会呈指数级增加。然后，使用 TMAG3001EVM 和 GUI 重现了该模型，我们可以直接观察到磁性变化与  $r^2$  成反比。

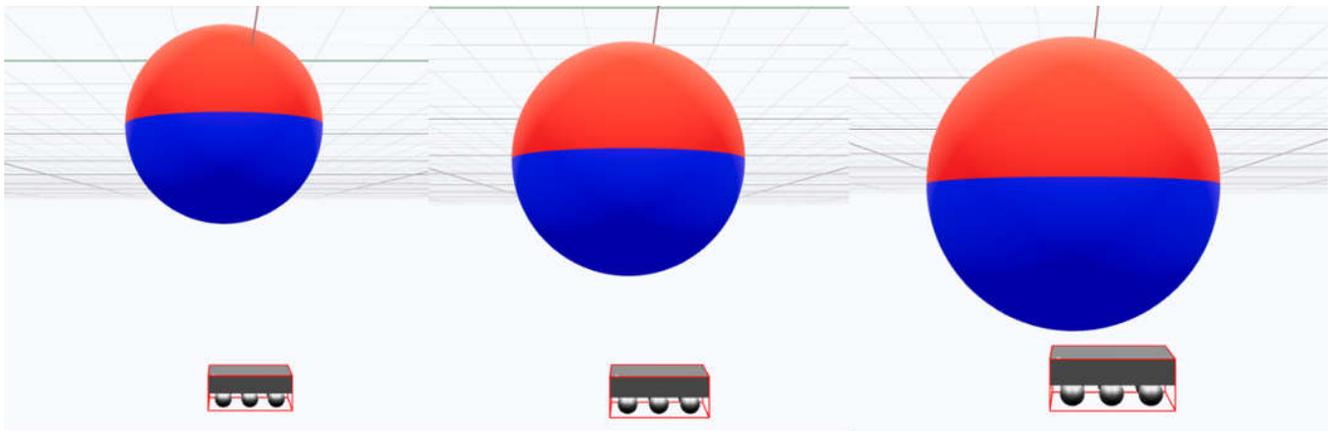


图 2-1. TIMSS 仿真模型

表 2-1. 在 Z 轴上移动磁体时的仿真结果

Z_axis 位移 (mm)	Bx(mT)	By(mT)	Bz(mT)
0	0	0	25.12599
0.25	0	0	29.55061
0.5	0	0	35.07820
0.75	0	0	42.07500
1	0	0	51.06340

在非理想情况下，可从传感器观察到 X 或 Y 偏移的主要原因有两个

- 操纵杆和 3D 线性霍尔传感器之间的机械误差
- 手动按下无法完全垂直于传感器

机械误差表明，与参考值相比，3D 线性霍尔传感器可能存在一定程度的偏差，如 图 2-2 所示。虽然这是以感应元件中心为目标而设计的，但焊接和产品组装过程中的制造公差不可避免地会导致一些潜在设计误差。

更重要的是，在因用户控制不理想而引起的按下操作过程中，操纵杆可能会略微倾斜。该机械误差导致在传感器所在位置，磁场矢量不再完全包含在 Z 轴内，并且可在 X 或 Y 轴上观察到某些元件。因此，经常会观察到与 X 或 Y 轴的偏移存在小幅偏差。

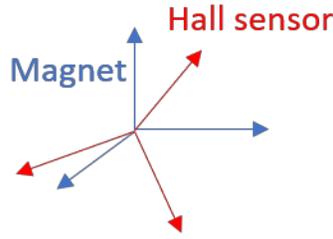


图 2-2. 磁体和霍尔传感器之间的机械误差

### 3 Z 轴按下检测方法

如节 2 中所述，在 Z 轴按下过程中，3D 线性霍尔传感器和操纵杆之间的机械误差会在 X 和 Y 轴上产生不良结果。例如，这可能会导致在尝试选择设置之前立即转到下一个菜单选项。这可能会导致 MCU 执行不必要的操作，从而对用户体验造成负面影响。

功能目标是 MCU 只能检测垂直按钮按下操作，且不在 X 和 Y 轴上执行任何操作。本应用手册探讨的算法用于 Z 轴中的快速按下检测方法，同时尽量减少对 X 和 Y 轴的影响。

#### 3.1 建议方法的大致介绍

一般而言，该检测方法使用硬件阈值中断和软件转换率或绝对值检测来降低 Z 轴按下操作对 X 和 Y 轴产生的影响。图 3-1 显示了 Z 轴按下过程中 Z 轴的磁通变化。沿 Z 轴的磁通变化与指数函数类似。为了尽快检测到按下操作，该方法采用两级磁场检测。

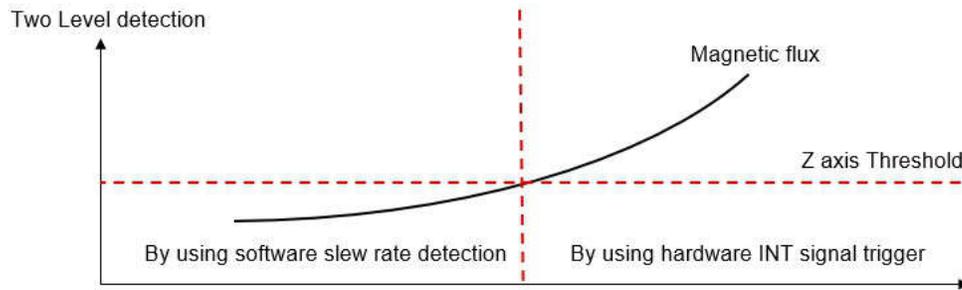


图 3-1. Z 轴按下操作过程中的磁通变化

#### 3.2 软件转换率检测

在按下操作开始时，霍尔效应传感器持续监测磁场，并将其发送到 MCU。MCU 检测到两个或更多样本之间的磁通差值大于预设值后，MCU 可以设置一个标志来表示 Z 轴已按下。该第一级按下检测通过软件实现。

用户可以手动调整软件的阈值，以适应不同的系统。例如，操纵杆中的不同磁体以及操纵杆和 3D 霍尔传感器之间的不同距离会导致 3D 线性霍尔传感器中出现不同的振幅响应。设定值可根据仿真或实验结果来定义。图 3-2 显示了简化的软件检测功能。

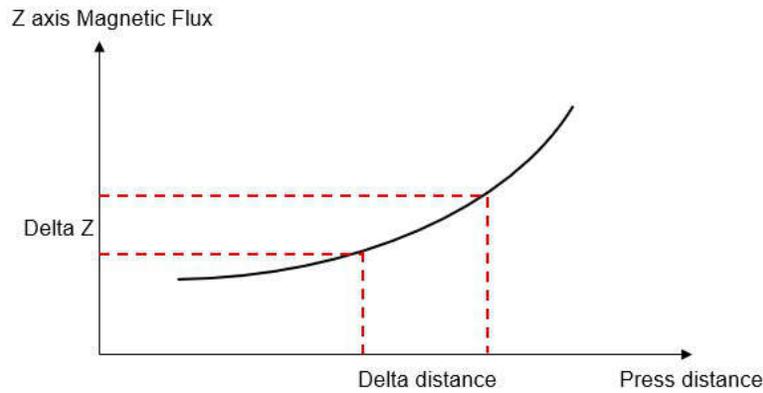


图 3-2. 软件检测方法

### 3.3 硬件阈值检测和中断

如果用户缓慢按下，两个或更多转换结果之间的振幅差异可能不会超过设置软件阈值。在这种情况下，需要进行二级硬件检测，以确保快速检测到按下操作。通过在 TMAG3001 寄存器中设置磁通阈值，Z 轴中的磁通振幅超过硬件阈值后，霍尔效应传感器会使用 INT 引脚创建中断信号，该信号将由 MCU 的 GPIO 捕获。如果需要，也可以通过 I2C 通信传输该阈值超越，以指示已超过磁性阈值。图 3-3 显示了简化的硬件中断功能。

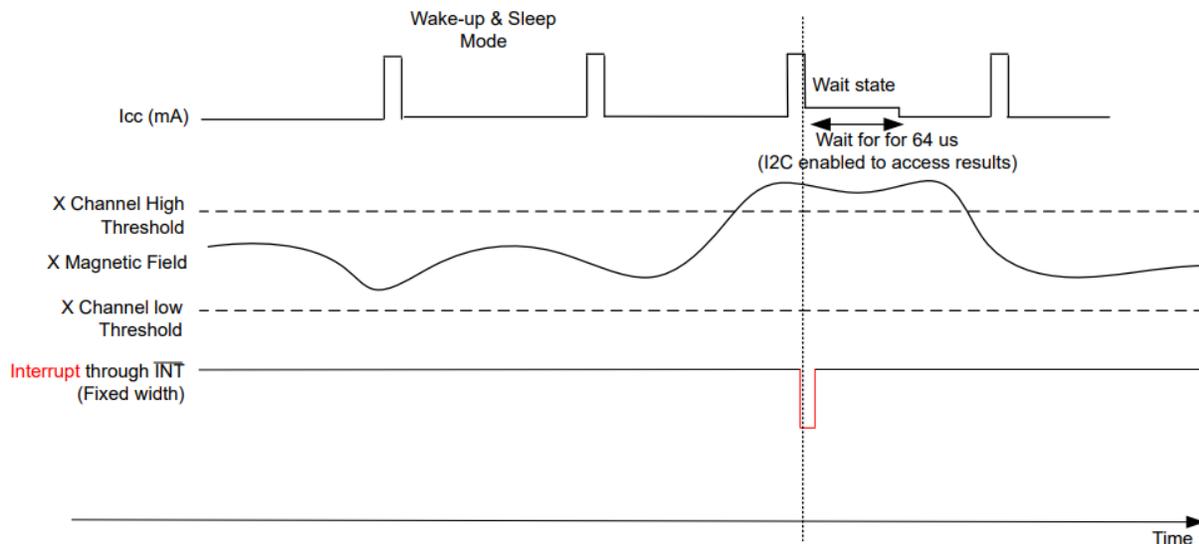


图 3-3. 硬件检测方法

### 3.4 锁存方法

触发了软件或硬件阈值后，TMAG3001 会创建输出标志作为指示符。在实际应用中，按下操纵杆后，只要 Z 轴保持按下状态，系统就不需要任何 X 和 Y 信息。在松开按下的按钮之前，可以忽略来自霍尔效应传感器的任何新 X 或 Y 输出数据，同时仅关注 Z 轴转换结果。

在本示例中，TI 霍尔传感器寄存器中的 MAG\_CH\_EN 函数用于在按下事件期间仅启用 Z 轴的转换。因此 3D 线性霍尔传感器可以仅将 Z 轴信息更新到 MCU。由于每次额外的轴转换都会增加传感器的总转换时间，因此在此期间仅在 Z 轴采样可缩短系统响应时间，从而恢复 X 和 Y 跟踪。

为了确保在按下按钮之前可靠地跟踪 X 和 Y 位置，使用数组创建缓冲区，以便在程序进入中断功能时立即保存 X 和 Y 信息。缓冲区中的数字用作 X 和 Y 转换数，以进一步减小偏移值。

### 3.4.1 两级检测方法的实现

下方以 TMAG3001 为例，详细说明了两级检测方法的实现。

1. 通过按下操纵杆，获取 Z 轴中的磁通变化  
该步骤用于为硬件检测设置正确的阈值，这是为软件检测设计的步骤。
2. 通过使用 TMAG3001 中的 THR\_Config\_3 寄存器或 TMAG5173 中的 Z\_THR\_Config，在 Z 轴上设置相应阈值。  
阈值越大，Z 轴上需要的按下距离就越大，因此 X 和 Y 上的偏移也越大。阈值越低，意味着 Z 轴上的按下距离缩小，但如果设置为低，这可能会导致误触发。
3. 通过向 INT\_CONFIG\_1 4-2 位写入 1h，在 INT 引脚中设置中断信号。  
INT 引脚向 MCU 发送信号，以指示磁通量已超过阈值。
4. 在正常运行期间，3D 线性霍尔效应传感器根据用户设置，以连续采样或触发采样模式工作。MCU 根据转换数来计算转换率或绝对变化值，从而确定是否超过阈值。
5. 硬件阈值或转换率超出设定值后，器件进入中断或锁存模式。之前的 X 和 Y 轴立即记录到数组中，然后 MAG\_CH\_EN 设置为 4H（仅转换 Z 轴磁通）。中断清除后，主函数返回正常工作模式，并将 MAG\_CH\_EN 设置为 7h（启用所有三轴转换）。

图 3-4 显示了建议检测方法的详细实现流程图。

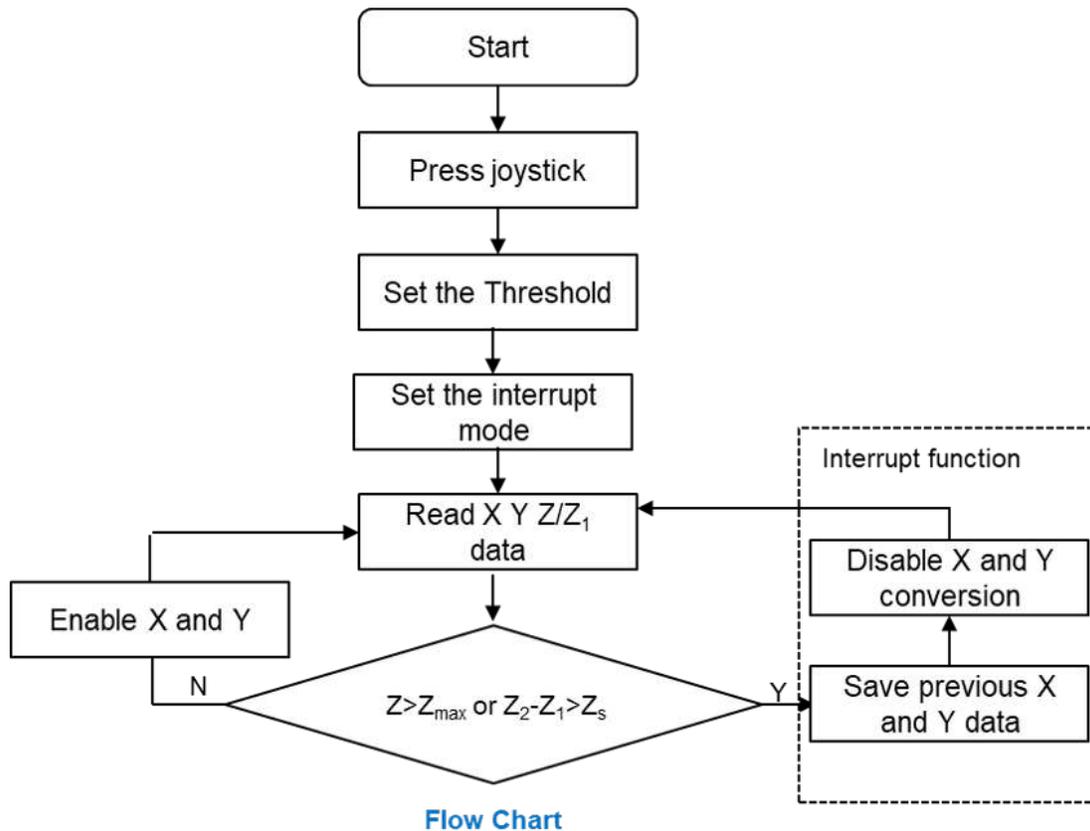


图 3-4. 建议方法的流程图

### 3.5 测试结果

为了测试建议方法的性能，通过使用客户的终端产品和定制操纵杆作为基础平台，实现了测试环境。

TMAG3001EVM 直接连接到操纵杆和 TI-SCB 板。TI-SCB 板连接到 XDS110 以与主机计算机进行通信。软件环境使用 TI CCS。为了保护客户信息，此处未显示客户信息图片。

关于代码，本应用手册首先使用 [TMAG3001 示例代码](#)，然后将修改后的代码和相关代码添加到代码中，以实现建议的方法。

建议算法的目的是在用户按下操纵杆时减小 X 和 Y 偏移。为了验证算法的性能，目标是比较按下操作后使用和不使用算法时的偏移值

1. 在不按下的情况下倾斜操纵杆，记录 X 和 Y 轴的最大值与最小值
2. 在按下的情况下倾斜操纵杆，记录 X 和 Y 轴的最大值与最小值。
3. 将建议的两级检测方法添加到代码中
4. 在按下的情况下倾斜操纵杆，记录 X 和 Y 轴的最大值与最小值。
5. 读取锁存器阵列中的缓冲区数据

步骤 1 和 2 用于证明机械误差。通过比较步骤 2 和 5，可以验证建议方法的性能。

图 3-5 和 图 3-6 分别显示了步骤 1 和 2 的结果。如这些图所示，按下拇指操纵杆后，最小值从  $-0.4\text{mT}$  降至  $-4.5\text{mT}$ 。这表明操纵杆和 TMAG3001 之间存在显著的机械误差。此外，这意味着器件沿 X 轴滚动。

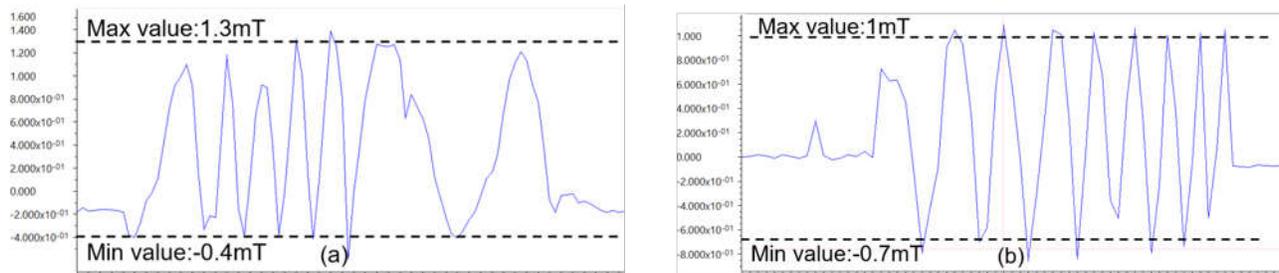


图 3-5. 不按下时的 Y 和 X 轴性能

从按下操作引起的偏移的角度来看，可以认为  $-4.5\text{mT}$  是不采取任何操作时的最大偏移。

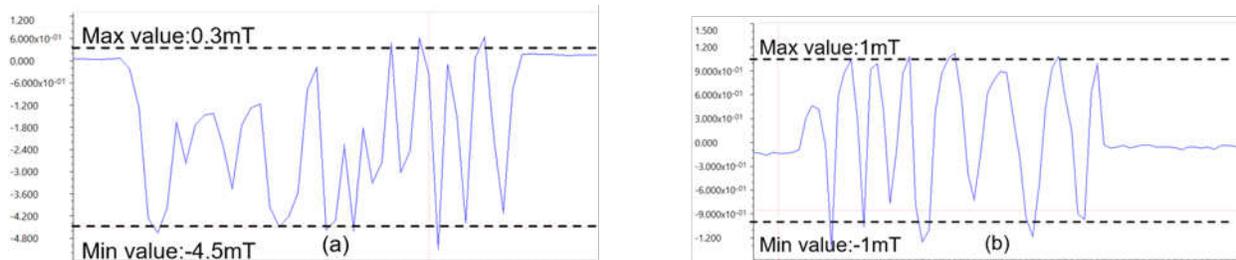


图 3-6. 按下时的 Y 轴和 X 轴性能

在步骤 3、4 和 5 中，由于 CCS 中双时间函数的刷新速度相对较慢，在缓冲区数组中读取转换数，如 图 3-7 中所示。图中的值是指触发前的最后一个 Y 轴转换值。

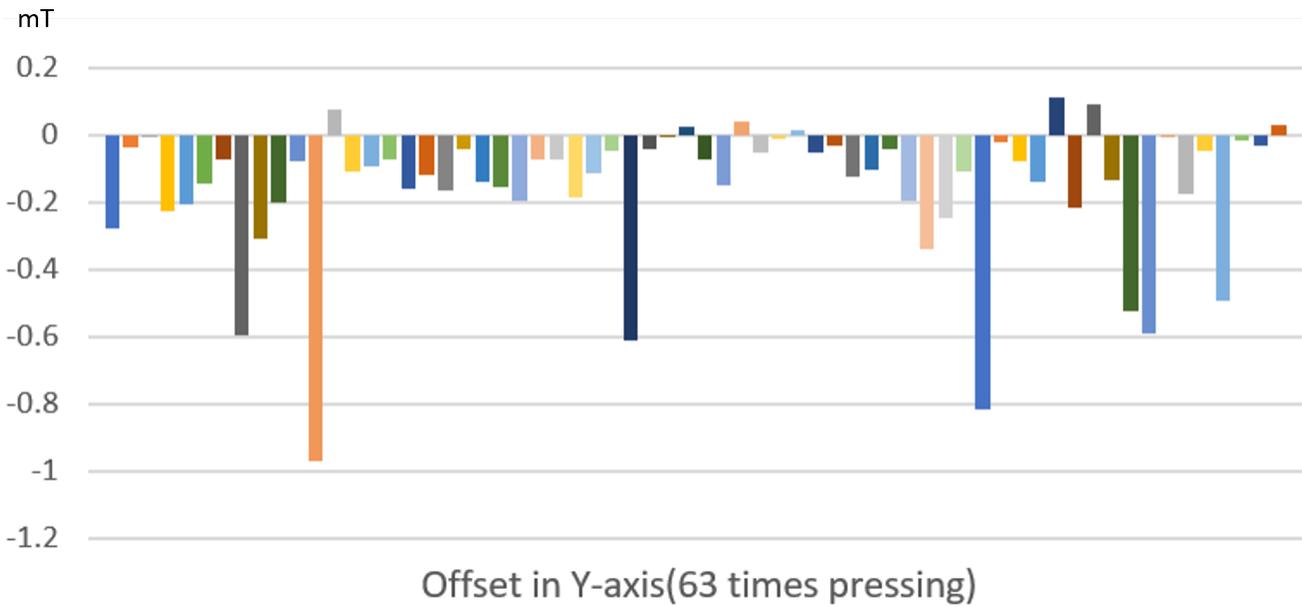


图 3-7. Y 轴上的偏移结果

使用不按下时的检测范围作为参考值，从而计算使用和不使用算法时的平均误差，结果如以下计算所示。由于 Y 轴受机械误差的影响最大且偏移量最大，因此在计算过程中将此用作参考值，不使用算法时的 Y 轴平均误差为 4.5/1.7mT，即 265%。实现算法后，数组中的平均误差为 -0.158mT，因此平均误差为 0.158/1.7mT，即 8.8%。

通过该两级检测方法，平均误差从 265% 降至 8.8%，这证明算法有效且易于实现，可更好地利用 TI 3D 线性霍尔传感器。

## 4 总结

通过实现两级磁通变化检测算法来检测 3D 线性霍尔效应传感器的按钮按下事件可减少因用户意外输入而导致 X 和 Y 轴输出的可能性。实验发现，该方法可将总误差百分比从 265% 降至 8.8%。这一改进不仅稳定了操纵杆位置的跟踪，还提高了最终用户的操作质量。

TI 拥有成熟的产品系列或 3D 线性霍尔效应传感器。请参阅 [表 4-1](#)，了解更多信息和封装信息。

**表 4-1. TI 3D 霍尔效应传感器**

器件	说明
<a href="#">TMAG5170</a>	具有 SPI 接口和集成 CORDIC、分辨率为 1/4 度的商用级 3D 线性霍尔效应传感器
<a href="#">TMAG5170-Q1</a>	具有 SPI 接口和集成 CORDIC、分辨率为 1/4 度的汽车级 3D 线性霍尔效应传感器
<a href="#">TMAG5170D-Q1</a>	具有 SPI 接口和集成 CORDIC、分辨率为 1/4 度的双芯片汽车级 3D 线性霍尔效应传感器
<a href="#">TMAG5173-Q1</a>	具有 I2C 接口和集成 CORDIC、分辨率为 1/16 度的汽车级 3D 线性霍尔效应传感器
<a href="#">TMAG5273</a>	具有 I2C 接口和集成 CORDIC、分辨率为 1/4 度的商用级 3D 线性霍尔效应传感器
<a href="#">TMAG3001</a>	具有 I2C 集成 CORDIC、唤醒检测功能、分辨率为 1/16 度的商用级 3D 线性霍尔效应传感器

## 5 参考资料

- 德州仪器 (TI), [TMAG5173-Q1 具有 I2C 接口的高精度 3D 霍尔效应传感器数据表](#)。
- 德州仪器 (TI), [采用霍尔效应传感器的操纵杆和控制杆设计用户指南](#)。
- 德州仪器 (TI), [利用霍尔效应传感器测量旋转运动的绝对角度应用简报](#)。
- 德州仪器 (TI), [TMAG3001 采用 WCSP 封装、具有 I2C 接口和唤醒检测功能的低功耗 3D 线性和角度霍尔效应传感器数据表](#)。

## 重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司